

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Spektrální měření propustnosti transparentních plastových
materiálů**

**Spectral Measurement of the Transparent Plastic Materials
Transmittance**

2018

Radoslav Rzyman

Zadání bakalářské práce

Student: **Radoslav Rzyman**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: Spektrální měření propustnosti transparentních plastových materiálů
Spectral Measurement of the Transparent Plastic Materials
Transmittance

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teoretický rozbor metod spektrálního měření.
2. Měření vlivu spektrální propustnosti na různé color biny daného typu LEDek.
3. Měření vlivu teploty materiálu nebo LEDky na spektrální charakteristiku.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Seznam doporučené odborné literatury:

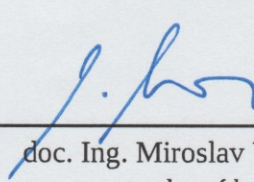
- [1] MALÝ, P. *Optika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013. ISBN 978-80-246-2246-0.
- [2] MAHAJAN, V. N. *Fundamentals of geometrical optics*. Bellingham: SPIE Press, 2014. ISBN 978-0-8194-9998-1.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

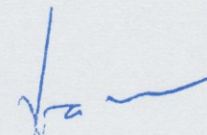
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Šiška, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 24. dubna 2018

.....*Bayman*.....
podpis studenta

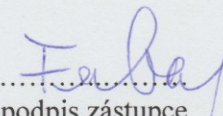
Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petrovi Šiškoví, Ph.D. a Ing. Petrovi Hajdukovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Dále bych poděkoval firmě Varroc Lighting Systems, s.r.o. za poskytnutí materiálů a vzorků potřebných k měření.

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské/diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne: 24. dubna 2018


.....
podpis zástupce

Abstrakt

Tato práce pojednává o metodách spektrální analýzy a s ní souvisejících pojmech, o elektromagnetických spektrech a jejich průchodech přes různá hmotná prostředí. Rozebírá hlavně viditelné spektrum záření. Práce obsahuje praktickou část měření, která obsahuje výsledky spektrálních analýz transparentních plastových materiálů. Měření má za úkol zjistit jak bude daný materiál propouštět světlo za různých tepelných podmínek a jak se bude měnit propouštěné spektrum.

Klíčová slova

Spektrální analýza; fotometrie; spektrofotometrie; spektroskopie; elektromagnetické záření; spektrum záření; emise záření; absorpce záření; spektrometr

Abstract

This work deals with methods of spectral analysis and its related concepts, about electromagnetic spectra and their passes through various material environments. It examines mainly the visible spectrum of emittance. The work contains practical part of the measurement, which contains the results of spectral analyzes of transparent plastic materials. The purpose of this measurement is to find out how the material will be transmitted under different heat conditions and how will the spectrum change.

Key words

Spectral analysis; photometry; spectrophotometry; spectroscopy; electromagnetic radiation; spectrum of light; radiation emissions; absorption of radiation; spectrometer

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
λ	nm	Vlnová délka světla
c	m/s	Rychlost světla
f	Hz	Frekvence
T	s	Perioda
h	J.s	Planckova konstanta
E	J/mol	Energie elektromagnetického záření
n	-	Index lomu
Φ	lm	Světelný tok
Ω	sr	Prostorový úhel
T	-	Transmittance
A	-	Absorbance
I	cd	Svítivost
Q	eV	Světelná energie
L	cd.m ²	Jas
T	°C	Teplota
I	A	Elektrický proud

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
AlGaAs	aluminium gallium arsenide
AlGaInP	aluminium gallium indium phosphide
AlGaN	aluminum gallium nitride
AlGaP	aluminium gallium phosphide
AlInGaP	aluminum Indium gallium phosphide
AlN	aluminium nitride
GaAs	gallium arsenide
GaAsP	gallium arsenide phosphide
GaN	gallium nitride
GaP	gallium phosphide
InGaN	indium gallium nitrid
LED	Light-Emitting Diode
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PMMA	Polymethylmetakrylát
PC	Polykarbonát
AAS	Atomová absorpční spektrofotometrie

Seznam ilustrací a tabulek

Číslo	Název	Číslo stránky
Obrázek 1.1	Elektromagnetické spektrum	13
Tabulka 1.1	Barvy viditelného spektra a jejich rozsah vlnových délek	13
Tabulka 1.2	Indexy lomu některých látek	15
Obrázek 1.2	Lom světla	15
Obrázek 1.3	Úplný odraz paprsku na rozhraní	16
Obrázek 1.4	Rozklad bílého světla, průchod světla hranolem	17
Obrázek 1.5	Příklad čárového spektra	18
Obrázek 1.6	Spojité spektrum	18
Obrázek 1.7	Emisní spektrum	19
Obrázek 1.8	Absorpční spektrum	19
Obrázek 1.9	Schéma LED	20
Tabulka 1.3	Materiály pro výrobu LED	21
Obrázek 1.10	Možnost tvarování OLED displeje a schéma jeho vrstev	21
Obrázek 1.11	Struktura výkonové LED	22
Obrázek 1.12	Graf typické voltampérové charakteristiky LED	23
Obrázek 1.13	Převodní charakteristika LED	24
Obrázek 1.14	Závislost světelného toku na teplotě a době svícení	24
Obrázek 1.15	MacAdamovy elipsy na chromatickém diagramu, color biny barevných LED společnosti Nichia	25
Obrázek 1.16	Schéma plochy prostorového úhlu	28
Obrázek 1.17	Přechody elektronů mezi energetickými hladinami	30
Obrázek 1.18	Průchod světla homogenním hmotným prostředím	31
Obrázek 1.19	Schéma spektrometru	32
Obrázek 1.20	Schéma Pulfrichova fotometru	33
Tabulka 1.4	Parametry použitých LED	34
Obrázek 1.21	Schéma pro měření spektra v závislosti na teplotě LED	34
Obrázek 1.22	Schéma pro měření spektra v závislosti na teplotě materiálu	35

Tabulka 1.5	Tabulka materiálů	35
Obrázek 1.23	Spektrální charakteristiky absorpcí filtrů	36
Obrázek 1.24	Porovnání vyzařovaných spekter barevných LED při teplotě LED 25 °C a 80 °C	37
Obrázek 1.25	Graf spekter oranžových LED	38
Obrázek 1.26	Spektrální charakteristiky absorpcí filtrů	39
Obrázek 1.27	Porovnání spekter bílých LED svítících přes červený filtr	40
Obrázek 1.28	Porovnání spekter bílých LED	41
Obrázek 1.29	Grafy spektrální propustnosti materiálu v závislosti na jeho teplotě	42
Obrázek 1.30	Grafy spektrální propustnosti materiálu v závislosti na jeho teplotě	43

Obsah

Úvod.....	- 14 -
1 Optika.....	- 15 -
1.1 Základní pojmy	- 15 -
1.2 Index lomu, Snellův zákon	- 16 -
1.3 Optický hranol.....	- 18 -
1.4 Optická mřížka	- 19 -
1.5 Druhy záření.....	- 19 -
1.6 Emise a absorpce záření	- 20 -
1.7 Dělení spekter.....	- 20 -
2 LED (Light Emitting Diode)	- 22 -
2.1 Organické LED (OLED)	- 23 -
2.2 Výkonové LED	- 23 -
2.2.1 Výkonové LED bílé barvy.....	- 24 -
2.2.2 Barevné výkonové LED	- 24 -
2.3 LED binning.....	- 27 -
3 Plastové materiály	- 28 -
3.1 PMMA (Polymethylmetakrylát).....	- 28 -
3.2 PC (Polykarbonát)	- 29 -
4 Spektrofotometrie, spektrometr.....	- 30 -
4.1 Fotometrické veličiny.....	- 30 -
4.2 Rozdělení optických metod	- 31 -
4.3 Emisní spektrální analýza.....	- 32 -
4.4 Absorpční spektrální analýza	- 33 -
4.5 Spektrometr	- 34 -
4.6 Princip spektrofotometrie, fotometrie	- 34 -
4.7 Princip atomové absorpční spektrofotometrie (AAS)	- 35 -
5 Praktická měření.....	- 36 -
5.1 Návrh experimentálního pracoviště.....	- 36 -
5.2 Naměřené a dosažené výsledky	- 37 -
5.2.1 Měření absorpce filtrů	- 38 -

5.2.2	Měření vlivu teploty na spektrální propustnost materiálu (PMMA, PC)-	43 -
Závěr		- 46 -
Použitá literatura		- 47 -
Seznam příloh.....		- 49 -

Úvod

Tato bakalářská práce pojednává o viditelném spektru elektromagnetického záření, základních optických pojmech, vlastnostech prostředí a záření, LED technologiích, plastových materiálech PMMA a PC a jejich vlastnostech a využití. Dále o metodách spektrální analýzy, o principu a funkci spektrometru.

Toto téma jsem si zvolil ve spolupráci s firmou Varroc Lighting Systems s.r.o., kde v praktické části se budu zabývat měřením a analýzou vyzařovaných spekter daných LED světelných zdrojů a absorpcí danými plastovými materiály.

Práci jsem rozčlenil do pěti kapitol.

První kapitola pojednává o optice, o základních optických pojmech, o popisu a vlastnostech elektromagnetického záření a optických prostředí. Rozdělení spekter a emise a absorpce záření.

Druhá kapitola pojednává o LED (Light emitting diode) technologiích a jejich využití a vlastnostech.

Ve třetí kapitole se zabývám plastovými materiály PMMA a PC a jejich optickým a materiálovým vlastnostem a jejich využití.

Čtvrtá kapitola je o metodách spektrofotometrie a jejich principu. O funkci spektrometru a jeho vlastnostech.

Poslední pátá kapitola jsou samotné zpracované výsledky a závěry z měření.

1 Optika

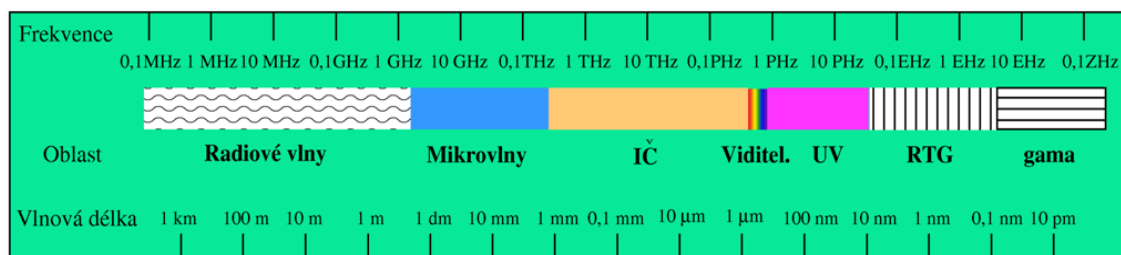
1.1 Základní pojmy

- **Elektromagnetické záření** je druh záření tvořené elektrickou a magnetickou složkou, jejichž vektory jsou v rovinách na sebe kolmých a kmitají různým směrem.
- **Vlnová délka** λ je vzdálenost dvou nejbližších bodů postupného periodického vlnění. Její základní jednotkou je metr m .

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

c - rychlost světla; T - perioda vlnění; f - frekvence vlnění

- **Elektromagnetické spektrum** je uspořádání elektromagnetických vln podle jejich vlnové délky.



Obrázek 1.1: Elektromagnetické spektrum

Tabulka 1.1: Barvy viditelného spektra a jejich rozsah vlnových délek

Barva	Vlnová délka	Frekvence
Červená	625 - 740 nm	405 - 480 THz
Oranžová	590 - 625 nm	480 - 510 THz
Žlutá	565 - 590 nm	510 - 530 THz
Zelená	520 - 565 nm	530 - 580 THz
Azurová	500 - 520 nm	580 - 600 THz
Modrá	430 - 500 nm	600 - 700 THz
Fialová	380 - 430 nm	700 - 790 THz

- **Frekvence (kmitočet)** udává počet kmitů za sekundu, udává se v s^{-1} a jednotkou je Hertz Hz , který odpovídá jednomu kmitu za sekundu
- **Rychlost šíření záření** se značí c nebo také v je pro všechny druhy elektromagnetického záření přibližně stejná a to $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- **Energie** elektromagnetického záření E jednotka J/mol platí vztah:

$$E = h \cdot f = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

Energie záření je nepřímo úměrná vlnové délce. V oblasti viditelného světla je energetické rozmezí $30 - 15 \cdot 10^4 \text{ J/mol}$

h je Planckova konstanta, která má hodnotu $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot s$

1.2 Index lomu, Snellův zákon

Index lomu (značí se n) je to bezrozměrná fyzikální veličina, která popisuje šíření světla a elektromagnetického záření v různém prostředí.

- **Absolutní index lomu** je definovaný jako poměr rychlosti šíření světla ve vakuu c a rychlosti v v daném prostředí:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.3)$$

Absolutní index lomu je charakteristikou konkrétního prostředí, jedná se o materiálovou konstantu. U řady pevných látek je tabelován. Protože index lomu je závislý na vlnové délce procházejícího záření, dochází na optickém hranolu k rozkladu světla. Protože je v každém prostředí rychlost světla nižší než rychlost světla ve vakuu, je absolutní index lomu vždy vyšší než jedna.

- **Relativní index lomu** je definovaný jako poměr rychlosti šíření světla ve dvou optických prostředích v_1 a v_2 :

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.4)$$

Relativní index lomu na rozhraní prostředí označených čísly 1 a 2 a označovaný obvykle n_{12} úzce souvisí s absolutními indexy lomu těchto prostředí n_1 a n_2 .

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.5)$$

Zatímco absolutní index lomu je materiálovou konstantou, relativní index lomu je závislý na uspořádání, obvykle tedy charakterizuje vlastnosti rozhraní dvou optických prostředí.

- **Snellův zákon lomu** je jeden ze základních zákonů, které popisují šíření elektromagnetického vlnění přecházející z jednoho prostředí do druhého. Tento zákon je jedním z nejdůležitějších pro geometrickou optiku.

Uvažujme dvě různá prostředí, jejichž rozhraní je rovinné. Jsou-li indexy lomu těchto dvou prostředí n_1 resp. n_2 a označíme-li úhel dopadajícího svazku α a úhel lomeného svazku β (měřeno ke kolmici rozhraní), pak podle Snellova zákona platí:

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \beta_1 \quad (1.6)$$

Tabulka 1.2: Indexy lomu některých látek

Látka	Index lomu	Vlnová délka
Vakuum	1	všechny vlnové délky
Vzduch	1,00026	589 nm
Led	1,31	589 nm
Voda	1,33	589 nm
Ethanol	1,36	589 nm
Glycerol	1,473	589 nm
Sklo	1,5 - 1,9	589 nm
PC	1,584	589 nm
PMMA	1,492	589 nm

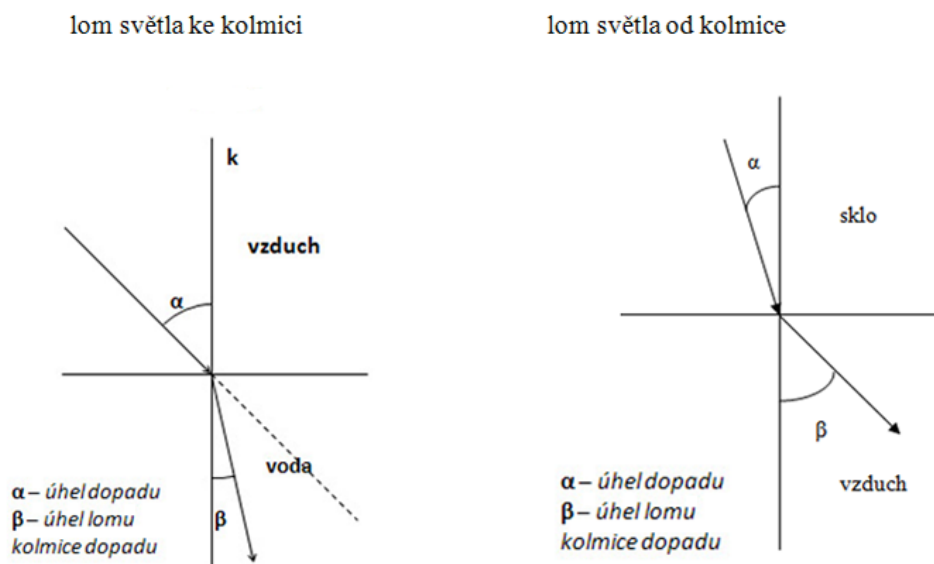
- **Závislost indexu lomu na teplotě a vlnové délce** je velmi významná, index lomu klesá se stoupající teplotou. Index lomu závisí na vlnové délce záření. Čím je vlnová délka menší, tím je rychlost v optickém prostředí menší a index lomu větší. Modré světlo se proto láme více než červené. Tato závislost indexu lomu na vlnové délce se nazývá chromatická disperze. [1]

- **Lom ke kolmici**

Při šíření záření z prostředí opticky řidšího do opticky hustšího prostředí ($n_1 < n_2$) se paprsky lámou směrem ke kolmici.

- **Lom od kolmice**

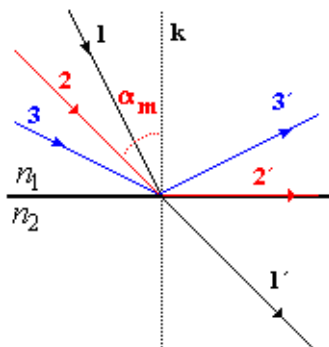
Při šíření záření z prostředí opticky hustšího do opticky řidšího prostředí ($n_1 > n_2$) se paprsky lámou směrem od kolmice.



Obrázek 1.2: Lom světla [2][3]

- **Úplný (totální) odraz**

Zvláštní případ lomu od kolmice nastává, pokud úhel dopadu paprsku je roven nebo větší než mezní úhel α_m . Tento jev můžeme pozorovat při přechodu z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího. Jelikož s rostoucím úhlem dopadu roste úhel lomu, při určitém mezním úhlu již k lomu nedochází a vzniká úplný odraz. Měřením mezního úhlu můžeme určit index lomu dané látky.



Obrázek 1.3: *Úplný (totální) odraz paprsku na rozhraní.* [4]

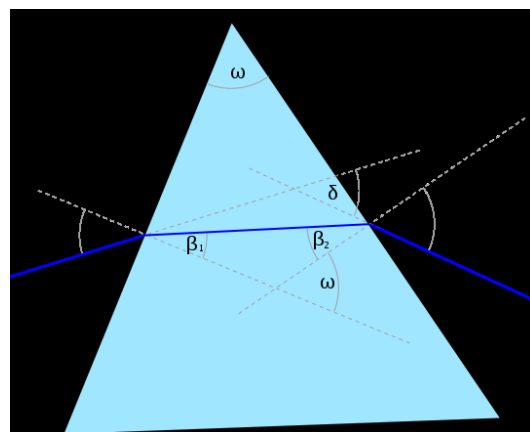
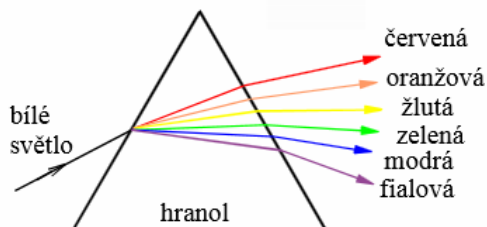
Dochází-li k lomu od kolmice, může při určitém úhlu dopadu nastat situace, že procházející paprsek bude kolmý na kolmici, tedy měl by procházet právě rovinou rozhraní. Tento úhel nazýváme mezní úhel. Pro paprsky, které při dopadu na rozhraní svírají s kolmicí úhel větší než mezní, se rozhraní chová jako zrcadlo a dochází k totálnímu odrazu. Velikost mezního úhlu α_m závisí pouze na indexu lomu:

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.7)$$

1.3 Optický hranol

Optický hranol je opticky průhledné těleso s dvěma rovinnými stěnami, které lámou světlo. Světlo při průchodu hranolem mění směr šíření rozkladem (disperzí) a úplným odrazem. Při průchodu optickým hranolem se světelný paprsek láme dvakrát. Po jednom lomu není rozklad světla příliš patrný, protože paprsky fialového a červeného světla svírají velmi malý úhel (řádově desetiny stupně). Proto se pro rozklad bílého světla používá vícenásobný lom na několika optických rozhraních. Nejčastěji se používá optický hranol vyrobený ze skla, které vykazuje značnou disperzi světla.

Na lámavých plochách optického hranolu se světlo láme dvakrát, a proto je odchylka barevných složek bílého světla od původního směru větší než při lomu na jednom rozhraní. Vymezíme-li úzkou štěrbinou svazek paprsků bílého světla, zobrazí se štěrbina na stínítku jako řada na sebe navazujících barevných proužků, kterou nazýváme hranolové spektrum. Bílé denní světlo se hranolem rozloží na spektrum, v němž jsou zastoupeny všechny barvy odpovídající paprskům monofrekvenčního světla v posloupnosti: červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá, fialová. Od červené barvy k fialové roste frekvence světla a tím i index lomu. Barvy nejsou rozloženy ve spektru rovnoměrně.



Obrázek 1.4: Rozklad bílého světla, průchod světla hranolem [5]

Při průchodu světla hranolem platí Snellovy zákony lomu.

$$\sin \alpha_1 = n \cdot \sin \beta_1$$

$$\sin \alpha_2 = n \cdot \sin \beta_2 \quad (1.8)$$

1.4 Optická mřížka

Optická (též difrakční) mřížka je optický prvek s pravidelným vzorem, který rozděluje a ohýbá světlo do několika svazků, šířících se různými směry. Směry šíření světla závisejí na vzdálenosti prvků mřížky a vlnové délce světla, takže optická mřížka může sloužit jako disperzní prvek pro rozklad světla podle vlnových délek. Difrakční mřížky jsou často používány v přístrojích, jako jsou monochromátory, spektrometry, lasery a mnoho dalších optických přístrojů. Obvyčejná lisovaná CD a DVD média jsou každodenním příkladem difrakční mřížky a mohou být použita k demonstraci optické mřížky například při odrazu slunečního světla na bílou zeď. Příkladem difrakce na mřížce v přírodě mohou být duhové barvy pavího peří, perlet, motýlí křídla, krovky brouků. Příčinou jsou velmi jemné struktury, které na svém pravidelném vzoru rozkládají světlo do barev. Optická mřížka je tvořena velkým počtem rovnoběžných vrypů na skle (až 1000 na 1 mm), kdy neporušená místa představují štěrbinu a vrypy mezery mezi nimi.

1.5 Druhy záření

Polychromatické záření obsahuje různé vlnové délky ze spektra. Například bílé světlo zahrnuje všechny vlnové délky z oblasti viditelného záření.

Monochromatické záření v ideálním případě obsahuje pouze jednu vlnovou délku, ale v praxi jeho spektrum obsahuje úzký pás rozsahu blízkých vlnových délek. Šířka tohoto rozsahu je pak měřítkem monochromatickosti. Monochromatické záření lze získat ze zdroje bílého světla pomocí mřížkového nebo hranolového monochromátoru.

Polarizované záření je záření, jehož kmity jsou pouze v jedné rovině kolmé na směr šíření záření. Lze ho získat různými způsoby: odrazem, lomem, dvojlomem nebo polaroidem.

1.6 Emise a absorpce záření

Emise záření je vysílání elektromagnetického záření (fotonů) z nějaké látky nebo hmoty. **Spontánní emise** je přechod látky z vyššího energetického stavu do stavu s nižší energií, při kterém molekula vyzáří foton. Jednotlivé atomy vyzařují fotony nekoordinovaně různým směrem s různou fází a vznikající elektromagnetické záření je nekoherentní. Tímto způsobem září například Slunce, žárovka, svíčka a jiné.

Stimulovaná emise je to emise koherentního elektromagnetického záření z látky vyvolaná dopadajícím zářením. Při tomto procesu dopadá foton na elektron ve vyšším energetickém stavu a způsobí jeho přechod do nižšího energetického stavu. To způsobí vyzáření dalšího fotonu se stejnou frekvencí, fází a směrem. Původní foton se při tom nepohlí a vyzářené fotony pokračují dále stejným směrem. Tento proces se může opakovat s dalšími molekulami a to má za následek zesílení záření. Nejčastější využití tohoto principu je v laserech, ale taky má uplatnění v urychlovači částic.

Absorpce záření je pohlcování elektromagnetického záření při průchodu hmotným prostředím. Je to opak emise, kde vlastně elektron pohlí foton a přejde do vyššího energetického stavu. Projevuje se zeslabováním intenzity záření a nastává i rozptyl světla, který závisí na vlastnostech materiálu a prostředí a na vlnové délce záření. V homogenním prostředí je velikost rozptylu minimální, tudíž je jeho míra zanedbatelná. Velikost absorpce závisí hlavně na tloušťce materiálu. [6]

1.7 Dělení spekter

Podle vzhledu

- *Čárová spektra* - spektrum složeno z několika barevných čar (plyny, jednotlivé prvky)



Obrázek 1.5: Příklad čárového spektra

- *Spojité spektra* - tvoří souvislý barevný pás, kde jednotlivé barvy přecházejí plynule mezi sebou. (slunce, žárovka, bílé světlo)

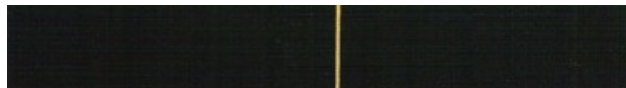


Obrázek 1.6: Spojité spektrum

- *Pásová spektra* - skládají se z velkého počtu čar, které jsou velmi blízko u sebe. (zářící molekuly látek)

Podle původu

- *Emisní spektra* - vznikají vyzařováním zahřátých látek



Obrázek 1.7: *Emisní spektrum*

- *Absorpční spektra* - vznikají po průchodu světla prostředím, kde se jeho určitá část pohltí.

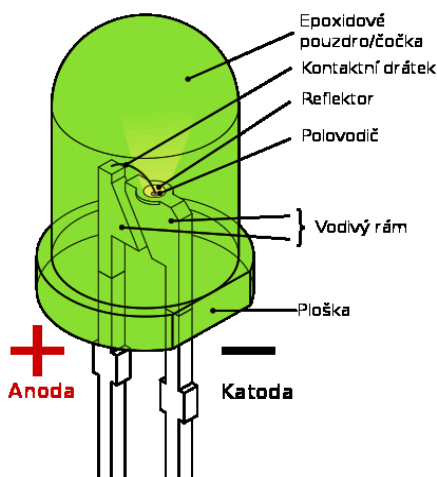


Obrázek 1.8: *Absorpční spektrum* [6]

2 LED (Light Emitting Diode)

LED je polovodičová elektronická součástka, jejíž vlastností je schopnost vyzařovat viditelné světlo, případně infračervené nebo ultrafialové záření. Používají se v mnoha zařízeních pro světelnou signalizaci (kontrolky, displeje) a stále častěji pro osvětlování. Jde o elektronickou polovodičovou součástku obsahující přechod P-N.

Prochází-li přechodem P-N diody LED elektrický proud v propustném směru, přechod vyzařuje (emituje) nekoherentní světlo s úzkým spektrem. Může emitovat i jiné druhy záření. Pásmo spektra záření diody je závislé na chemickém složení použitého polovodiče. LED jsou vyráběny s pásmy vyzařování od ultrafialových, přes různé barvy viditelného spektra, až po infračervené pásmo.



Obrázek 1.9: Schéma LED

Z principu funkce LED vyplývá, že nelze přímo emitovat bílé světlo. Starší bílé zářící diody většinou obsahují trojici čipů vybíraných tak, aby bylo aditivním míšením v rozptýlném materiálu obalu diody dosaženo vjemu bílého světla. Protože není možné přímo emitovat bílé světlo, novější bílé LED využívají luminoforu. Nejběžnější způsob získání bílého LED světla je použití žlutého fosforu na modrou LED. Žlutý fosfor transformuje část modrého záření na žluté světlo a díky mísení těchto barev lidské oko vnímá výsledné záření jako bílé. Jiné typy bílých LED emitují ultrafialové záření, to je přímo na čipu luminoforem transformováno na bílé světlo.

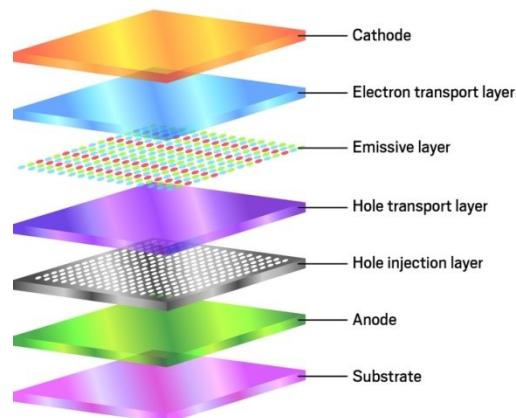
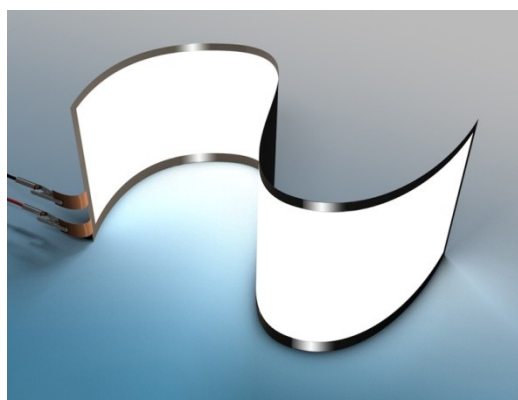
Oproti jiným elektrickým zdrojům světla (žárovka, výbojka, doutnavka) mají LED tu výhodu, že pracují s poměrně malými hodnotami proudu a napětí. Z toho vyplývá jejich užití v displejích, osvětlovací technice a světlech automobilů. Kombinací LED základních barev (červená, zelená, modrá) je možno získat i barevné obrazovky. [7]

Tabulka 1.3: *Materiály pro výrobu LED diod*

Materiál	Barva světla	Vlnová délka [nm]	Napětí [V]
GaAs, AlGaAs	Infračervená	> 760	< 1,9
AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP	Červená	610 - 760	1,63 - 2,03
GaAsP, AlGaInP, GaP	Oranžová	590 - 610	2,03 - 2,10
GaAsP, AlGaInP, GaP	Žlutá	570 - 590	2,10 - 2,18
InGaN/GaN, GaP, AlGaInP, AlGaP	Zelená	500 - 570	1,9 - 4
ZnSe, InGaN, SiC, Si	Modrá	450 - 500	2,48 - 3,7
InGaN + luminofor	Fialová	400 - 450	2,76 - 4
AlN, AlGaIn, AlGaInN	Ultrafialová	< 400	3,1 - 4,4
SiC/GaN + luminofor	Bílá	Celé spektrum	3,5

2.1 Organické LED (OLED)

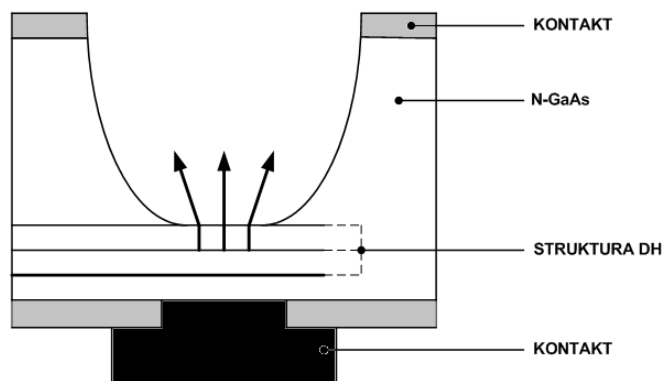
Na rozdíl od tradičních anorganických LED na bázi komplexní krystalické struktury se u OLED jako elektroluminiscenční látka využívají organické materiály. Zároveň nejsou vyráběné na pevných podložkách, ale potřebné uspořádání zajišťují organické molekuly. Konstrukce OLED je tvořena substrátem, transparentní elektrodou, jednou nebo více organickými vrstvami, opačnou elektrodou a pouzdrům, které zabraňuje oxidaci. V momentě, kdy je do některé vrstvy přivedeno napětí, jsou vyvolány kladné a záporné náboje, které se spájejí ve vyzařovací vrstvě a tím produkují světelné záření. Struktura a použité elektrody jsou přizpůsobeny tak, aby docházelo k maximálnímu střetávání nábojů ve vyzařovací vrstvě. Tloušťka OLED displeje je jenom několik tisíců milimetrů a zároveň poskytují vysoký jas a světlo pro displeje s velkým pozorovacím úhlem. Využívají se při konstrukci displejů, např. v televizních obrazovkách a mobilních telefonech a v osvětlovací technice se používají jako světelné panely.

Obrázek 1.10: *Možnost tvarování OLED displeje a schéma jeho vrstev [8]*

2.2 Výkonové LED

Rozdíl mezi výkonovými LED a klasickými LED je v uspořádání polovodičových vrstev, které mají odlišné vlastnosti a složení. Použitím dvojité heterogenní struktury se u

výkonových LED dosahuje větší intenzita záření. Tato struktura je tvořená ze dvou různých polovodičových materiálů a větším počtem PN přechodů. K rekombinaci děr a elektronů dochází v tenké oblasti, kterou vymezuje právě daná heterogenní struktura.



Obrázek 1.11: *Struktura výkonové LED*

Z důvodu optimálního odvádění tepla je spodní kontakt LED z aktivní oblasti. Takovýmto uspořádáním se zvyšuje ztrátový výkon, čím dochází ke zvýšení světelného výkonu a zároveň je světlo emitováno do všech směrů.

2.2.1 Výkonové LED bílé barvy

Výkonové LED bílé barvy ve skutečnosti generují světlo barvy modré, ale na jejich povrchu je nanesená vrstva žlutého luminoforu. U výkonových LED bílé barvy se používá žlutý luminofor označovaný jako YAG (Yttrium, Aluminium, Garnet). Základním prvkem tohoto luminoforu je chemický prvek Yttrium (Y). Je to šedobílý vzácný kovový prvek.

Luminofor do značné míry absorbuje fotony modrého světla a následně emituje světlo s nižší energetickou úrovní (delší vlnovou délkou). Výsledné spektrum bílého světla je potom tvořené luminiscencí, kterou vyzařuje čip a fosforescencí, kterou vyzařuje žlutý luminofor. Pak výsledné světlo těchto dvou vlnových délek vnímáme jako světlo bílé.

2.2.2 Barevné výkonové LED

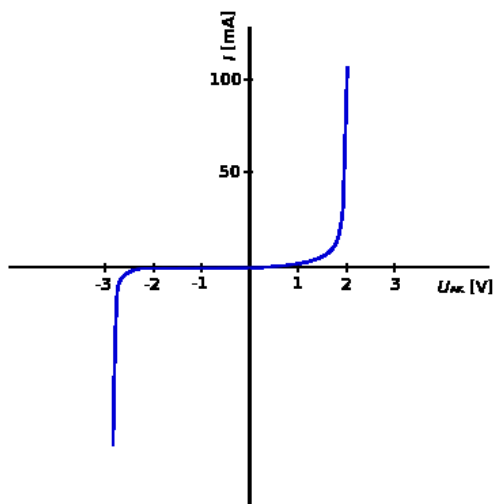
Barevné diody mají společnou anodu nebo katodu a obsahují tři nezávislé čipy základních barev (červená, zelená a modrá). Využívají se k osvětlení jakékoliv barvy pomocí míšení třech základních barev. Jednotlivé barevné složky se sčítají a vytvářejí světlo větší intenzity a vznikají různé barvy podle poměru zastoupených barevných složek. Vzniklá intenzita se rovná součtu intenzit jednotlivých složek. Můžeme dosáhnout bílého světla, generováním intenzit třech primárních barev světla.

Pro barevné LED se používají dva základní materiály pro výrobu P-N přechodů. první je AlInGaP určený pro LED, které vyzařují záření o vlnové délce z rozsahu 590 - 640 nm, co odpovídá žlutým až červeným barvám. Druhým materiálem je InGaN a používá se pro LED vlnové délky 450 - 530 nm, což je modrá až zelená barva.

Voltampérová charakteristika

Závislost proudu na napětí má podobný průběh jako běžná polovodičová dioda. Liší se pouze hodnotami hraničních napětí v propustném a závěrném směru.

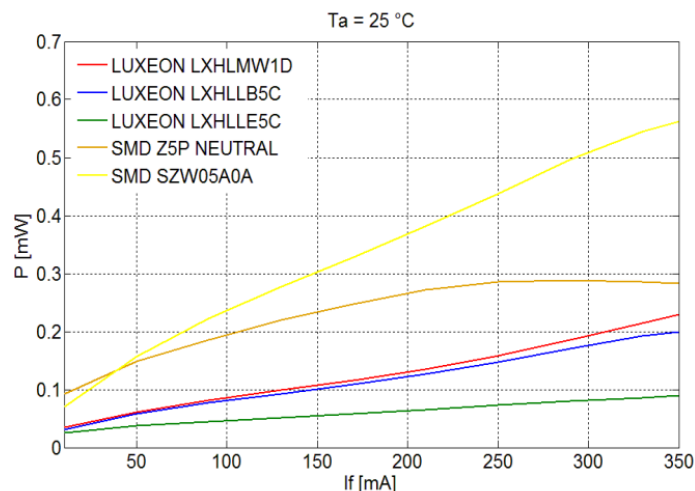
Zvyšujeme-li od nuly napětí na diodě v propustném směru (tj. kladný pól zdroje je připojen na anodu a záporný pól zdroje na katodu diody), zpočátku LED neprochází téměř žádný proud - chová se, jako by byla nevodivá. Od určité výše přiloženého napětí dojde k zlomu - dioda se začne otevírat a na další drobné zvyšování napětí reaguje prudkým nárůstem procházejícího proudu. Proud vzhledem k napětí roste přibližně exponenciálně. Tehdy se dioda začíná také rozsvěcet. Zvyšujeme-li dále napětí, dioda zvyšuje svůj jas, až dosáhne svého maxima. Závislost svítivosti LED na proudu je v této oblasti přibližně lineární, tj. např. při dvojnásobném zvýšení proudu dojde ke zhruba dvojnásobnému zvýšení intenzity světla vydávaného diodou. Při dalším zvyšování proudu nad povolenou mez může dojít k tepelnému přetížení polovodičového přechodu a poruše diod. Na obrázku 1.12 vodorovná osa U_{nk} znázorňuje napětí, svislá osa I proud. Kladná část grafu zobrazuje chování diody v propustném směru, záporná část grafu chování v závěrném směru.



Obrázek 1.12: *Graf typické voltampérové charakteristiky LED.*

Převodní charakteristika

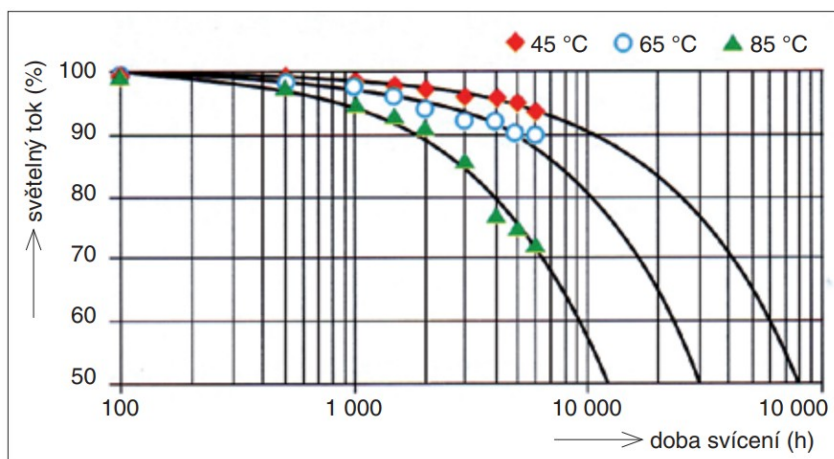
Je též označovaná jako PI charakteristika, popisuje závislost optického výkonu P na procházejícím proudu I_f LED. Nárůst procházejícího elektrického proudu ovlivňuje optický výkon a úroveň vyzářeného světla. Avšak je to na úkor životnosti LED a její vyšší spotřeby energie, které mají za následek větší zahřívání a vyšší nároky na její chlazení. Naopak při poklesu procházejícího elektrického proudu, dochází k poklesu optického výkonu a vyzářeného světla, co vede k nutnosti použití soustavy LED pro dosažení určitého světelného toku.



Obrázek 1.13: Převodní charakteristika LED

Závislost na teplotě

Vlivem času PN přechod ztrácí svoje vlastnosti. Postupem času se začínají prolínat příměsi mezi jednotlivými vrstvami a jedná se tedy o migraci atomů do míst, kde je jich méně. Je to pomalý a velmi zdoluhavý proces. Zvyšující se teplotou narůstá pohyblivost částic, zvětšuje se strmost takové závislosti a migrace atomů má podstatně větší vliv na životnost PN přechodu. Následkem tohoto procesu je pokles světelného toku LED, protože v PN přechodu klesá pravděpodobnost vzniku zářivé rekombinace a zvyšuje se pravděpodobnost rekombinací nezářivých. Na obrázku č. 1.14 je uvedena grafická závislost světelného toku LED diody na čase při různých teplotách, kde při provozní teplotě 85 °C se krátí střední doba životnosti o přibližně 7000 hodin oproti provozu při teplotě 45 °C.

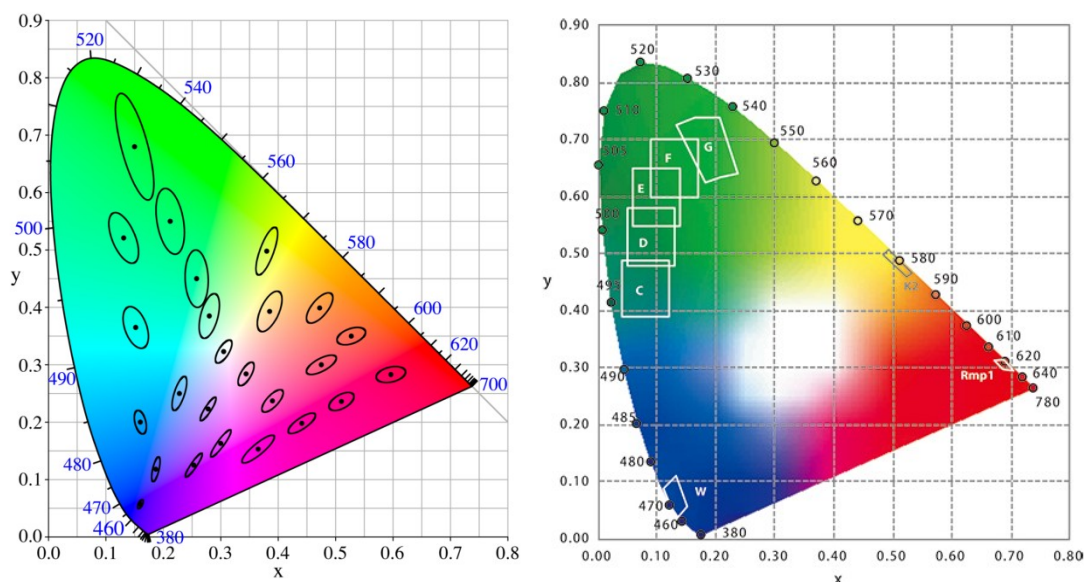


Obrázek 1.14: Závislost světelného toku na teplotě a době svícení [9]

2.3 LED binning

LED jsou masově vyráběny, kde každý výrobce má svojí vlastní technologii a rychlost výroby. Ne každá stejně vyrobená LED stejné barvy je totožná, proto se musí každá otestovat a roztrždit. Ihned po vyrobení se každá LED testuje po dobu zhruba 20 milisekund, aby se zabránilo jejímu zbytečnému zahřívání, jelikož ještě nejsou vybaveny žádným chlazením. Během daných 20 milisekund se otestuje barevnost, světelný tok a jejich napájecí napětí. Tyto parametry jsou zaznamenány a LED jsou pak podle nich roztrženy do daných binů.

Color Binning je nejznámější a nejpoužívanější třídění LED do binů podle jejich barvy. Jelikož je lidské oko schopné rozpoznat jakýkoliv menší rozdíl mezi odstíny stejné barvy, používá se CIE 1931 chromatický diagram, který znázorňuje barvy viděné lidským okem za denního světla do barevných souřadnic. V letech 1930 - 1940 americký fyzik David MacAdam dokázal pomocí pokusů, že na chromatickém diagramu existují oblasti, kde se kolem jednoho bodu dá nakreslit elipsa o určitém rozměru, ve které se nacházejí odstíny dané barvy, které lidské oko sotva rozpozná nebo je není schopno vůbec rozpoznat. Podle tohoto principu se řídí výrobci LED a třídí je do tzv. boxů nacházejících se na chromatickém diagramu. [10][11]



Obrázek 1.15: MacAdamovy elipsy na chromatickém diagramu, color biny barevných LED společnosti Nichia [12]

3 Plastové materiály

3.1 PMMA (Polymethylmetakrylát)

V technické praxi je známý jako organické sklo. Jeden z mnoha typů je dodáván pod obchodním označením „Plexiglas (plexisklo)“ a tento název se velmi často nevhodně užívá jako obecný. Jedná se o amorfní termoplast s dokonalou propustností světla (až 92 %). Vzhledem k jeho chemickému složení (přítomnosti kyslíku) se jedná o polární plast s výbornými mechanickými vlastnostmi (kyslík má za následek větší mezimolekulární síly) a patří mezi konstrukční plasty. Přítomnost kyslíku v makromolekule se projevuje částečnou navlhavostí plastu, zhoršením elektroizolačních a dielektrických vlastností a nízkou odolností silným kyselinám a rozpouštědlům. Velmi dobře odolává povětrnostním podmínkám a UV záření.

Výhody:

- vysoká tvrdost, tuhost a pevnost
- vysoká kvalita povrchu: vysoký lesk, odolnost proti poškrábání, možnost leštění
- výborné optické vlastnosti, především vysoká průzračnost; kopolymery jsou mírně nažloutlé
- vysoká tepelná odolnost
- dobré elektrické a dielektrické vlastnosti
- odolnost proti slabým kyselinám a louchům, nepolárním rozpouštědlům, tukům, olejům a vodě
- vysoká odolnost proti povětrnostnímu stárnutí
- lze jej dobře zpracovávat i následně mechanicky opracovávat

Nevýhody:

- náchylnost k prasknutí při nárazu
- hořlavost

Optické a tepelné vlastnosti

PMMA vyniká optickými vlastnostmi. Je bezbarvý, čirý a viditelné světlo téměř nepohlcuje. Jeho propustnost pro světlo činí 92 % a index lomu je 1,492. Má nejvyšší propustnost světla ze všech plastů. Propustnost lze zachovat i při vybarvení PMMA transparentními barvami. Rovněž povrchový lesk je vynikající. Desky z PMMA pohlcují ultrafialové světlo. Stačí deska o tloušťce 2 mm, aby došlo k pohlcení veškerého UV záření.

Teplota skelného přechodu PMMA činí 106 °C, pro odlévané polotovary až 115 °C. Teplota měknutí podle Vicat B se pohybuje závislosti na hodnotě střední molární hmotnosti od 84 do 111 °C. Z toho vyplývá, že PMMA patří mezi termoplasty s dobrou teplotní odolností. Výrobky lze dlouhodobě trvale používat až do teplot 100 °C. [13]

3.2 PC (Polykarbonát)

Polykarbonát je z chemického hlediska rovněž polyester, velmi často se však řadí do samostatné skupiny. Jedná se o amorfní, dokonale průhledný termoplast, který se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi. Polykarbonáty mají nejen dobrou pevnost a tuhost, ale také tvrdost, houževnatost a odolnost proti lomu (těleso nepraskne ani při prudkém nárazu).

Využití

Rozšířené je zejména použití polykarbonátu v optice. Jedná se o konstrukční díly fotoaparátů, kamer, blesků, promítacích přístrojů, dalekohledů, jejich kazet, hledáček, clon atd. Z polykarbonátu se vyrábějí světlovody i optické systémy. Dnes snad nejvýznamnější optickou aplikací polykarbonátu je výroba optických disků – CD, u nichž se uplatňuje spojení vynikajících optických vlastností s mechanickou pevností a houževnatostí.

V dopravní technice se využívá průhlednosti výrobků z polykarbonátu při výrobě krytů svítidel, automobilových světel, ukazatelů směru, signálních světel či různých průhledných krytů ukazatelů a počítadel. Jeho průhlednosti kombinované s odolností proti nárazu se využívá u ochranných přileb a brýlí.

Optické a tepelné vlastnosti

Podobně jako PMMA je bezbarvý a čirý a má vynikající optické vlastnosti. Jeho propustnost je o něco menší, činí cca 90% a index lomu je 1,584. Má vysokou propustnost světla. Oproti PMMA má menší odolnost vůči UV záření, proto se na něj nanáší tenká vrstva methakrylátu pro zvýšení odolnosti.

Oproti PMMA plastu má zvýšenou teplotní odolnost. Teplota tání PC činí 267 °C a teplota skelného přechodu je 150 °C. Díky tomu lze tento plast používat až do teplot kolem 140°C. [14]

Abbeovo číslo

Abbeovo číslo v optice je bezrozměrné číslo, které udává disperzní mohutnost daného průhledného prostředí (např. skla) v oblasti viditelného světla. Hodnota Abbeova čísla vyjadřuje, jak moc je index lomu daného materiálu závislý na vlnové délce světla. Jinými slovy, jak silně daný materiál rozkládá světlo. Platí přitom, že čím vyšší hodnota Abbeova čísla, tím méně daný materiál rozkládá světlo.

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (3.1)$$

kde n_D , n_F a n_C je index lomu příslušného materiálu na vlnových délkách odpovídajících Fraunhoferovým čárám D, F a C (tj. 589,2 nm, 486,1 nm a 656,3 nm). Čím je hodnota V vyšší, tím menší má materiál disperzi a je tedy vhodnější pro použití v optice. Běžné hodnoty jsou v rozsahu cca 20 až 70.

Hodnota Abbeova čísla pro PMMA činí 57.8 a pro PC je 32.

4 Spektrofotometrie, spektrometr

Fotometrie je oblast optiky, která popisuje světlo a jeho účinky na lidské oko. Pomocí fotometrických veličin udává vlastnosti zdrojů světla a osvětlených ploch.

Spektrofotometrie se zabývá vlastnostmi a vznikem spekter a je založená na interakci elektromagnetického záření se vzorkem. Zkoumá míru, jakou látka pohlcuje nebo vyzařuje světlo určité vlnové délky.

4.1 Fotometrické veličiny

Jsou to veličiny vztažené k elektromagnetickému záření, které je viditelné lidským okem a kvantitativně hodnotí toto záření velikostí možného vizuálního vjemu.

- **Svítivost (I)** je základní fotometrická veličina a její základní jednotkou je 1 candela (*cd*). Vyjadřuje svítivost světelného zdroje, svítícího v daném směru. Je určena podílem světelného toku vyzařeného do prostorového úhlu.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (4.1)$$

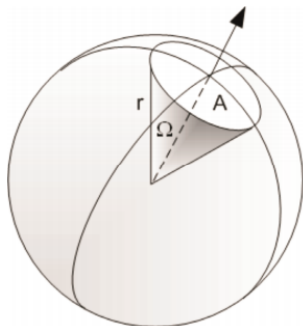
- **Světelný tok (Φ)** vyjadřuje množství světelné energie, kterou zdroj vyzaří za jednotku času. Základní jednotkou je 1 lumen (*lm*). Charakterizuje světelný výkon záření.

$$\Phi = I \cdot \Omega \quad (4.2)$$

- **Světelná energie** je část spektra viditelného záření, které dokáže člověk zachytit zrakem. Tuhle energii vyzařuje do svého okolí zdroj záření. Jednotkou je Joule (*J*) nebo elektronvolt (*eV*).

$$Q = \Phi \cdot t \quad (4.3)$$

- **Prostorový úhel** - jeho velikost je určena velikostí plochy, kterou vytne kuželová plocha na povrchu jednotkové koule, která má střed totožný s vrcholem kuželové plochy (vrcholem prostorového úhlu). Jednotkou je steradián (*sr*).



Obrázek 1.16: Schéma plochy prostorového úhlu [15]

Prostorový úhel Ω , pod kterým je ze středu koule o poloměru r vidět plochu A vyřatou na povrchu této koule se určí podle vztahu:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (4.4)$$

- **Osvětlení** (E_v) vyjadřuje světelný tok dopadající na plochu. Základní jednotkou je lux (lx). Je to podíl světelného toku (v lumenech) a plochy (v m^2).

$$E_v = \frac{\Phi}{s} \quad (4.5)$$

- **Jas** objektu je ovlivněn svým povrchem a intenzitou světla, které na něj dopadá. Čím intenzivnější bude světlo, tím vyšší bude jas objektu. Jas označujeme L a jeho jednotkou je kandela na m^2 (cd/m^2).
- **Transmittance** určuje množství světla určité vlnové délky, které prošlo vzorkem. Ta je definována jako podíl intenzity světla, které prošlo vzorkem s původní intenzitou, která do vzorku vstoupila.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (4.6)$$

T - transmittance; I - intenzita světla, které prošlo vzorkem; I_0 - původní intenzita světla

- **Absorbance** udává, kolik světla bylo měřeným vzorkem pohlceno. Definuje se na základě transmittance jako:

$$A = -\log T$$

rovnici můžeme rozepsat na tvar:

$$A = -\log T = -\log \frac{I}{I_0} = \log \frac{I_0}{I} \quad (4.7) [16]$$

4.2 Rozdělení optických metod

Optické analytické metody využívají jevů spojených se vznikem elektromagnetického záření a jevy spojené s interakcí záření s analyzovanou látkou. Pomocí různých zařízení a přístrojů měříme optické veličiny, které jsou definovány nějakým matematickým vztahem s měřenou veličinou. Optické metody se dělí na nespektrální a spektrální metody.

Nespektrální metody jsou metody, při kterých nesledujeme výměnu energie mezi látkou a zářením, ale sledujeme změny vlastností záření jako změny jeho rychlosti a rozptyl záření. Mezi nespektrální metody patří například refraktometrie, polarimetrie, interferometrie a další.

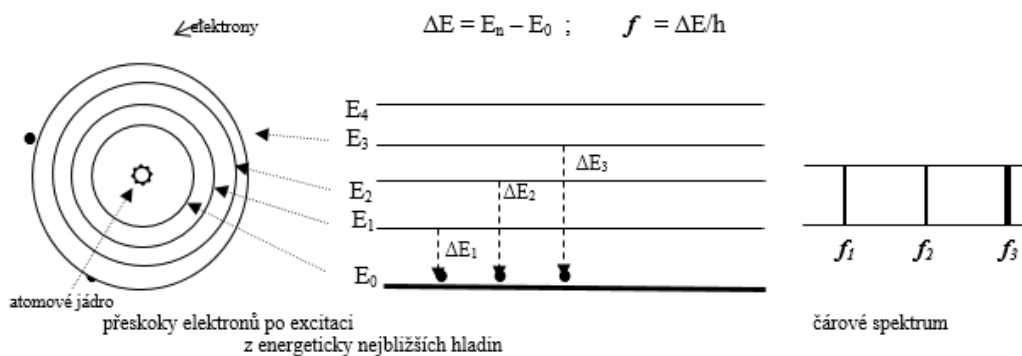
Spektrální metody jsou založené na výměně energie mezi látkou a zářením. Spektrum je závislost veličiny, která je mírou intenzity vysílaného záření na určité vlnové délce. Spektrální metody se dále dělí na metody emisní a absorpční.

- **Emisní metoda** je založena na měření vyzařovaného záření vzorkem. Emise se vyvolává dodáním energie vzorku v podobě elektrické energie, tepla, proudu elementárních částic nebo jiného elektromagnetického záření.
- **Absorpční metoda** sleduje pohlcování záření vzorkem. Používáme při nich různé vlnové délky z oblasti elektromagnetického spektra záření. Podle použitého druhu záření a vlastností vzorku má mnoho dalších metod (ultrafialová, infračervená, viditelná spektrometrie).

4.3 Emisní spektrální analýza

Zakladateli těchto metod jsou G. Kirchhoff a R.W. Bunsen v polovině 19. století. Podstata této metody spočívá v tom, že zkoumaná látka se vkládá do zdroje záření (elektrická jiskra nebo elektrický oblouk, plamen apod.), a tato látka sama vydává záření, které po průchodu spektrálním zařízením (spektrograf) poskytuje čárové emisní spektrum. Podle polohy čár ve spektru (vlnové délky) se určuje kvalita obsažených prvků a podle intenzity spektrálních čár je možné určit jejich obsah (kvantita).

Důkaz prvků provádíme metodou tzv. posledních, zbytkových čili rezonančních čár, které odpovídají přeskokům excitovaných elektronů z energeticky nejbližších hladin na hladinu základní. Tyto čáry jsou nejintenzivnější a charakteristické pro jednotlivé prvky. Poloha čáry udává zároveň vlnovou délku příslušného záření. Hodnoty λ spektrálních čár v získaném emisním spektru zjišťujeme porovnáním polohy těchto čár s normálem, tj. s čárovým spektrem železa. Toto spektrum je velmi bohaté na spektrální čáry a jím odpovídající λ . resp. f . Prvek považujeme za prokázaný teprve tehdy, najdeme-li ve spektru 3 jeho čáry



Obrázek 1.17: Přechody elektronů mezi energetickými hladinami

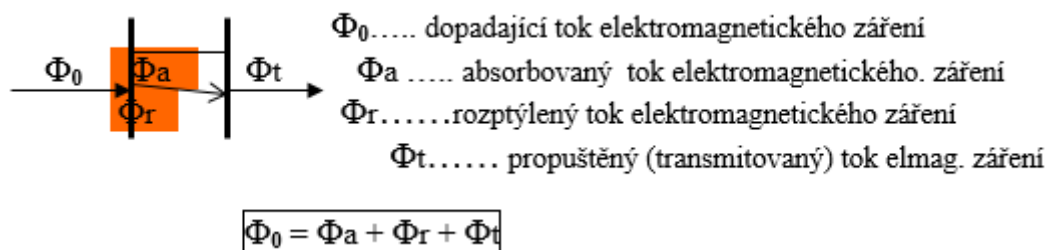
Emisní spektrální analýza má značný význam v anorganické analýze, zejména ve strojírenském a hutnickém průmyslu pro stanovení kovů. Používá se rovněž při stanovení stopových množství biogenních prvků v popelu zkoumaného vzorku.

Mezi používané metody emisní spektrální analýzy patří plamenová fotometrie, plamenová spektrofotometrie a plamenová spektrografie. [17]

4.4 Absorpční spektrální analýza

Absorpční spektrální analýza, jinak absorpční spektroskopie, studuje absorpční spektra (přesněji elektronová absorpční spektra), vznikající rozkladem záření (viditelného i UV v blízké oblasti), které prošlo nějakým homogenním hmotným prostředím (roztok, plyn). Absorpční spektrální analýza pracuje se zářením v oblasti viditelného a blízké oblasti UV záření, tj. 185 až 700 nm. Když záření, které opouští absorbující látku, rozložíme hranolem nebo mřížkou, pak za předpokladu, že zdroj světla vysílá spojité spektrum, získáme absorpční spektrum přerušované buď tmavými pruhy, nebo čarami při vlnové délce světla charakterizujícího pozorovanou absorpci. Pruhy či pásy absorpční spektra odpovídají molekulám látek a poskytují je roztoky anorganických i organických látek. Čárová absorpční spektra náleží plynům nebo párám prvků. Dělí se na atomová a molekulová spektra. Atomová spektra jsou jednodušší než spektra molekulová, jejichž čáry se hustě seskupují a tvoří téměř pásy.

Použití absorpční spektrální analýzy: Rozbor absorpčních spekter umožňuje řešit vztahy mezi konstitucí látek a její charakteristickou absorpcí. Poloha příslušného absorpčního spektra má kvalitativní povahu, intenzita sledované absorpce má charakter kvantitativní. Výhodou absorpčních spektrálních metod je jejich rychlost a spolehlivost.



Obrázek 1.18: *Průchod světla homogenním hmotným prostředím* [18]

Jelikož velikost absorpce je různá pro různé látky a různé vlnové délky, používáme pro přesná měření monochromatické světlo té vlnové délky, pro kterou v dané látce je absorpce maximální (λ_{max}). Každá látka má svůj λ_{max} , při které nastává maximální absorpce a při které pak provádíme vlastní měření.

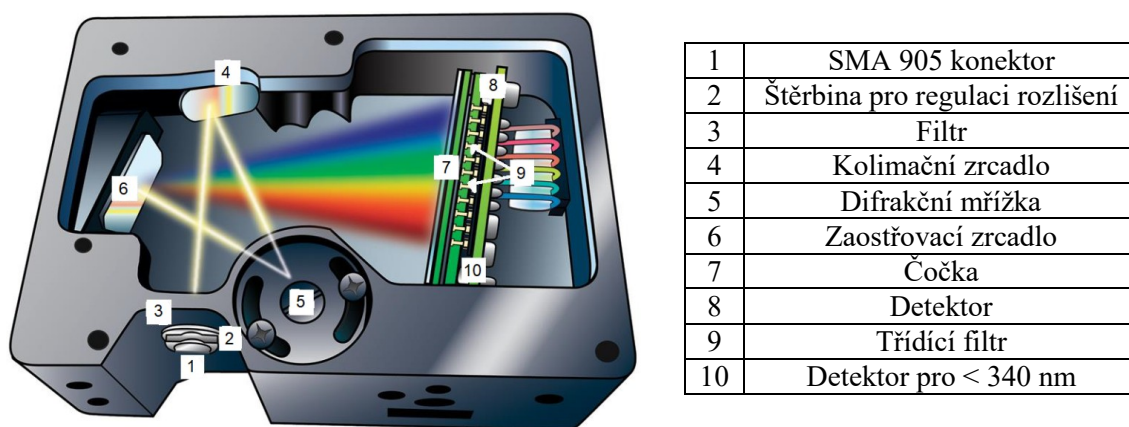
Rozdělení absorpční spektrální analýzy.

- **kolorimetrii** – pracujeme s viditelným zářením, detektorem intenzity záření je oko.
- **spektrofotometrii**: subjektivní – pracujeme s viditelným zářením, detektorem intenzity záření je oko. Objektivní – pracujeme s viditelným zářením, detektorem intenzity záření je fotočlánek nebo fotonka.
- **atomová absorpční spektrofotometrie** [19]

4.5 Spektrometr

Spektrometrem se rozumí přístroj, do něhož dopadá světlo vstupní štěrbinou a který vytváří ve výstupní rovině obraz vstupní štěrbinu, jehož poloha je závislá na vlnové délce světla. Tato závislost polohy obrazu na vlnové délce vzniká díky disperznímu prvku, který je hlavní součástí spektrografu.

Může to být optický hranol nebo v současné době spíše optická ohybová mřížka. Uspořádání mřížkového spektrometru je schematicky znázorněno na obr. 1.19. Pokud se do výstupní roviny umístí plošný detektor, který zaznamenává rozložení intenzity světla v závislosti na poloze, tedy na vlnové délce, tj. spektrum světla, nazývá se přístroj spektrografem. O monochromátoru se mluví, když se do výstupní roviny umístí štěrbina, která propouští světlo určitého úzkého intervalu vlnových délek.



Obrázek 1.19: Schéma spektrometru

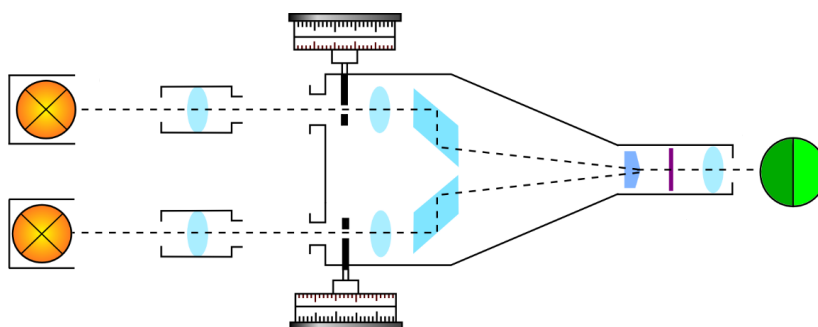
Světlo vstupuje do monochromátoru vstupní štěrbinou, je kolimováno zrcadlem a dopadá na difrakční mřížku. Světlo je fokusováno druhým zrcadlem do výstupní roviny.

Každý spektrometr je charakterizován svými parametry, k nimž patří zejména světelnost, spektrální propustnost a spektrální rozlišení (rozlišovací schopnost). Mřížkové spektrometry mohou pracovat v celém spektrálním rozsahu od vakuové ultrafialové až po dalekou infračervenou oblast. Optické prvky spektrometru, zejména mřížky, bývají optimalizovány pro určitou spektrální oblast, pro kterou se bude přístroj používat.[20]

4.6 Princip spektrofotometrie, fotometrie

Fotometrie je absorpční metoda, která pracuje s monochromatickým zářením z oblasti viditelného světla. Monochromátorem je filtr. K detekci intenzity záření používáme buď oko (vizuální fotometrie – subjektivní metoda, méně přesná) nebo fotočlánek (objektivní fotometrie, přesnější). Metoda využívá Lambert – Beerova zákona. Přístroje pro fotometrická stanovení se

nazývají *fotometry*. Známe jich celou řadu, která se liší konstrukcí a přesností. Nejznámějším, dnes již nepoužívaným přístrojem byl Pulfrichův fotometr.



Obrázek 1.20: Schéma Pulfrichova fotometru

Spektrofotometrie je založená na stejném principu jako ostatní absorpční metody. Od fotometrie se liší pouze tím, že monochromatické záření vzniká průchodem světla mřížkou nebo hranolem. Intenzitu prošlého záření detekujeme rovněž fotoelektricky (fotonkou, fotočlánkem nebo fotonásobičem).

Jelikož vlnová délka používaného monochromatického záření je mnohem přesnější (rozdíl od fotometrie či kolorimetrie), jsou dosahované výsledky měření přesnější než u předcházejících provedení. Kromě toho spektrofotometrie může pracovat s vlnovými délkami z blízké oblasti UV záření.

4.7 Princip atomové absorpční spektrofotometrie (AAS)

Je to směr spektrální absorpční analýzy využívající absorpční čárová spektra. Tato analytická metoda založena na platnosti Kirchhoffova zákona, podle kterého *každá látka absorbuje záření té vlnové délky, kterou sama vyzařuje*. U prvků se jedná o tzv. *atomovou absorpci*. Atomovou absorpční spektrofotometrii měříme absorpci, úbytek intenzity, záření přesné vlnové délky procházejícího plamenem, ve kterém je rozprašen analyzovaný vzorek. Tento úbytek je úměrný koncentraci prvku rozprašovaného do plamene a měří se fotoelektrickým přístrojem, většinou spektrofotometrem (atomový absorpční spektrofotometr). U atomové absorpční spektrofotometrie vyhodnocujeme výsledky metodou analytické (kalibrační) křivky podobně jako u emisní plamenové fotometrie. Atomové absorpční spektrofotometrie se v praxi využívá při stanovení asi 30 prvků, mj. Na, K, Mg, Ca, Zn, Cu, Ag, Pb a dalších a to jak v anorganických tak i organických materiálech. Výhodou této metody je zejména možnost přímého stanovení prvků bez předchozí separace. [21]

5 Praktická měření

Cílem praktických měření bylo zjištění vlivu teploty na vyzařované spektrum daných LED, které se používají ve světlometech automobilů pro různé funkce. Dalším bodem měření bylo zjištění změny spektrální propustnosti materiálu při jeho zahřátí na teplotu 70°C. Jako zdroje záření byly použity výkonové LED různé barvy. Pro měření bylo vybráno 7 různých LED, jejichž parametry jsou v tabulce 1.4.

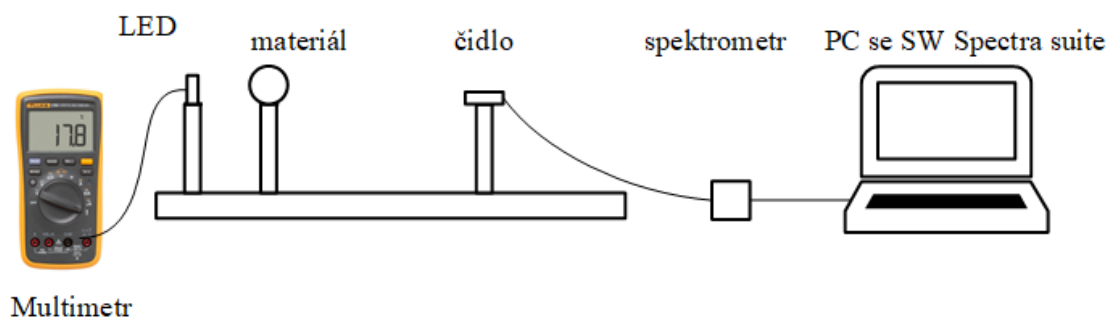
Při experimentálním měření byla využita mnou navržená experimentální pracoviště, která byla navržena tak, aby se dala zaznamenávat jednotlivá spektra LED za dodržení stálých podmínek (teploty a proudu). Měření probíhala v zatemněné místnosti.

Tabulka 1.4: *Parametry použitých LED*

Název	Proudový rozsah	Pracovní proud	Vlnová délka	barva
KY DMLN31.23	5...200 mA	150 mA	590 nm	Oranžová
KR DMLN31.23	5...250 mA	200 mA	621 nm	Oranžovo-červená
KS DMLQ31.23	10...500 mA	350 mA	632 nm	Super červená
NFSA 172E	5...250 mA	150 mA	610 nm	Oranžová (konvertovaná)
NCSW 170CT	85...1200 mA	1000 mA	--	Studená bílá
NCSW 170BT	85...1200 mA	1000 mA	--	Teplá bílá
NCSW 170CT	85...1200 mA	1000 mA	--	Neutrální bílá

5.1 Návrh experimentálního pracoviště

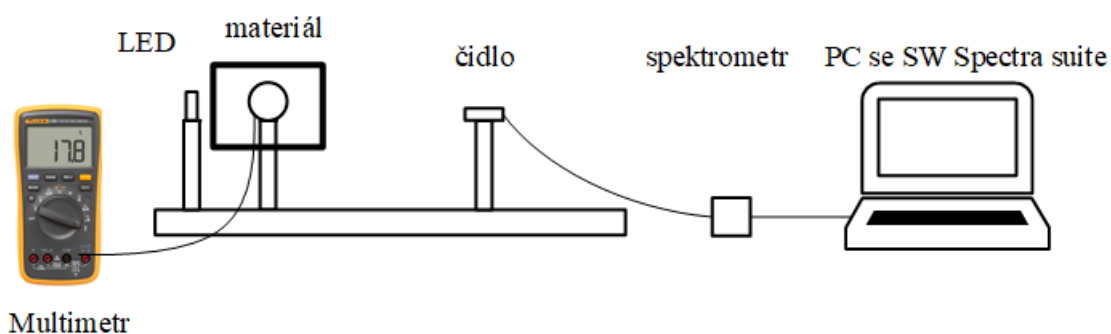
Pro měření spekter vybraných světelných zdrojů, bylo nutné navrhnout a sestavit měřicí pracoviště tak, aby se dala regulovat teplota a pracovní proud podle potřeb měření. Základem celého pracoviště jsou komponenty ThorLabs sady, pomocí které jsem uchytí čidlo, dané materiály a LEDky na jednom místě. Jako zdroj napájení jsem použil laboratorní proudový zdroj s rozsahem proudu $I_f = 0 - 4 \text{ A}$, u kterého je možné měnit hodnoty proudu po 10 mA. Pro regulaci teploty jsem použil horkovzdušný ventilátor, kterým jsem nahříval LED na danou teplotu 80 °C. Pro odečet teploty jsem použil multimetr Fluke 17B s teplotní sondou.



Obrázek 1.21: *Schéma pro měření spektra v závislosti na teplotě LED*

Pro měření spektra jsem použil USB spektrometr Red Tide a jako čidlo jsem použil optické vlákno s SMA konektorem. Hodnoty jsem odečítal pomocí počítače se softwarem Spectra suite firmy Ocean optics.

Pro měření spektrální propustnosti pro různou teplotu materiálu nebylo nutné nijak zásadně měnit pracoviště. Materiál se uzavřel do boxu, do kterého byl vháněn horký vzduch z ohřívače, teplotní sonda se umístila dovnitř boxu a daný materiál jsem zahříval na požadovanou teplotu 70 °C. Z boku boxu byly dva uzavíratelné otvory, které se pak otevřely, aby se mohl daný filtr prosvítit a změřit vyzařené spektrum. Obě měření probíhala v zatemněné místnosti, aby se zamezilo negativnímu vlivu denního světla v podobě nežádoucího šumu.



Obrázek 1.22: Schéma pro měření spektra v závislosti na teplotě materiálu

5.2 Naměřené a dosažené výsledky

V rámci experimentálního měření bylo u vybraných světelných zdrojů odečítáno a zaznamenáváno jejich vyzařované spektrum při teplotě LED 25 °C a 80 °C. Vzdálenost zdroje světelného záření a filtru od čidla byla cca 350 mm. Měření probíhalo za stálé teploty a stálého pracovního proudu I_f podle daného typu LED. K měření jsem měl k dispozici 7 různých LED a k tomu 9 filtrů z PMMA a PC materiálů.

Tabulka 1.5: Tabulka materiálů

Materiál	Název materiálu	Index lomu
PMMA	Altuglas V825T 7157 (smoke 10%)	1,492
	Altuglas V825T 7080 (smoke 50%)	
	Altuglas V825T 7250 (smoke 100%)	
	Altuglas V825T Red 18244	
	Altuglas V825T Red 182425	
	Altuglas V825T Amber 25226	
	Altuglas V825T 101	
PC	Makrolon AL2647 550396	1,584
	Makrolon LED 2245	

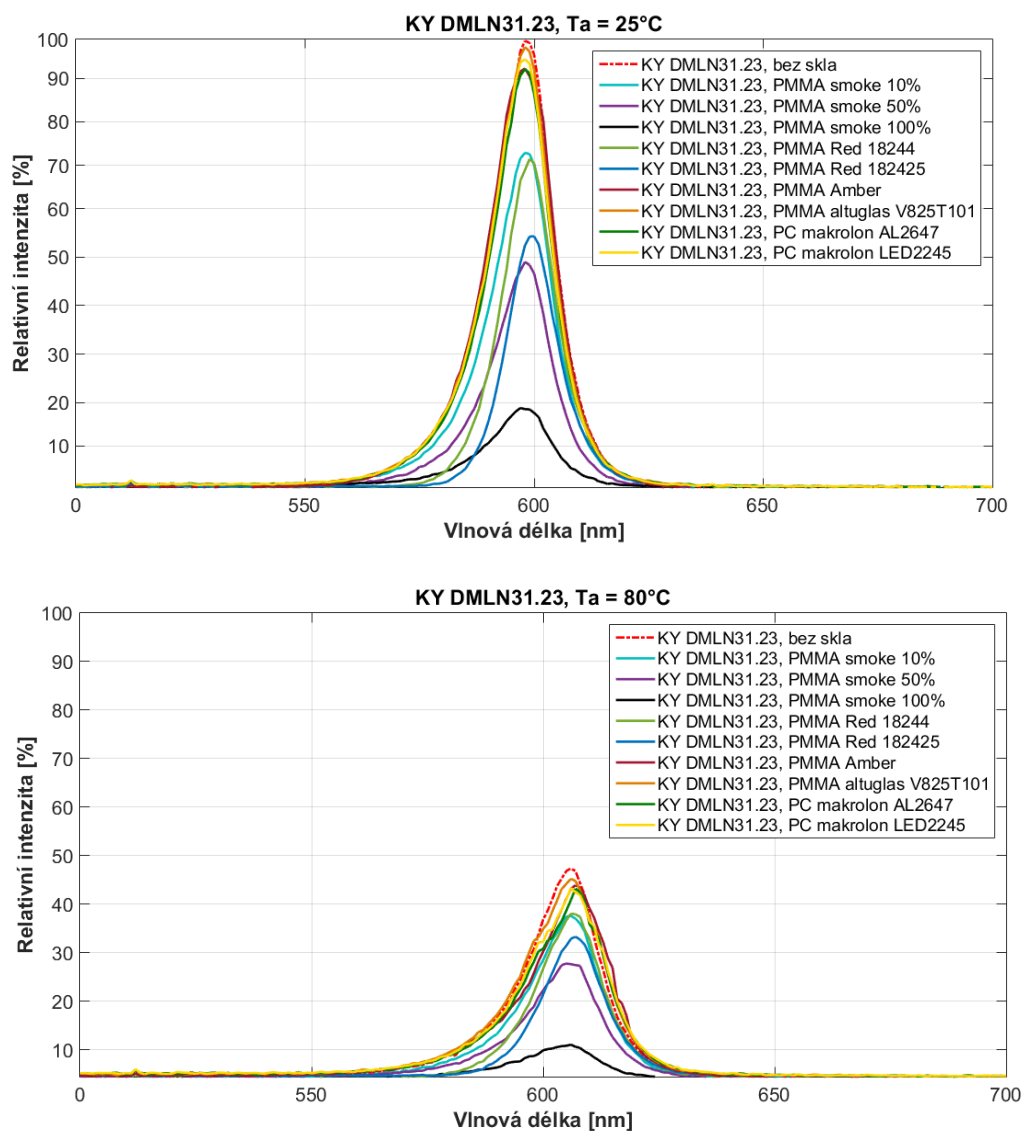
Použité barevné a čiré PMMA materiály se využívají pro výrobu skel zadních světlometů, zatímco čiré PC Makrolon AL se využívá pro skla předních světlometů a PC Makrolon LED se používá pro výrobu optických prvků a světlovodů do světlometů.

5.2.1 Měření absorpce filtrů

Barevné LED

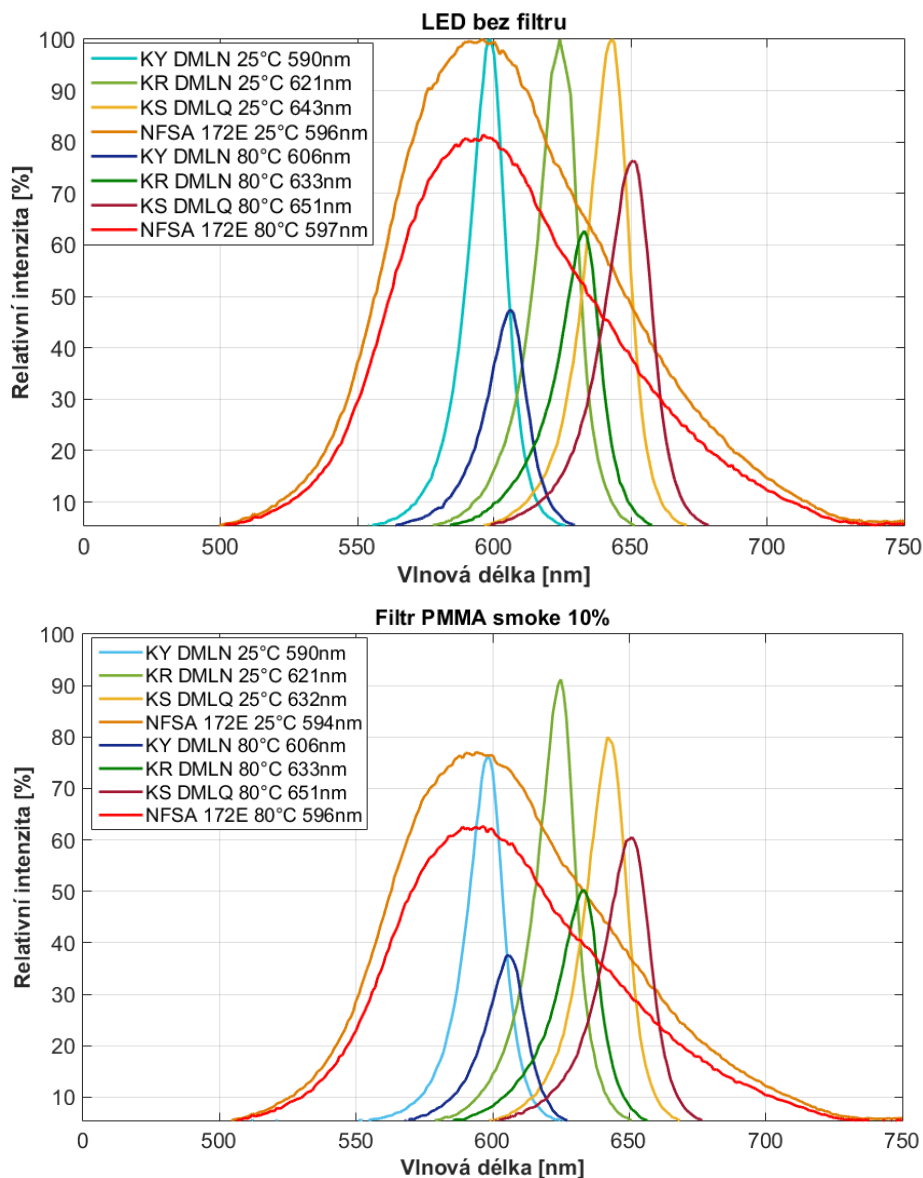
Měřená LED s označením KY DMLN31.23 o vyzařované vlnové délce 590 nm, barva oranžová, při stálém pracovním proudu $I_f = 150$ mA a dvou různých teplotách 25 °C a 80 °C. Měření probíhalo v zatemněné místnosti pomocí spektrometru Red Tide USB650 a obslužného programu Spectra suite.

Z grafů na obrázku 1.23 je vidět úbytek výkonu a intenzity záření dané LED při teplotě 80 °C, kde u této LEDky klesl její výkon o více než polovinu. Zároveň se její vyzářené spektrum posunulo zhruba o 20 nm k vyšším vlnovým délkám, což může mít za následek viditelnou změnu odstínu její barvy.



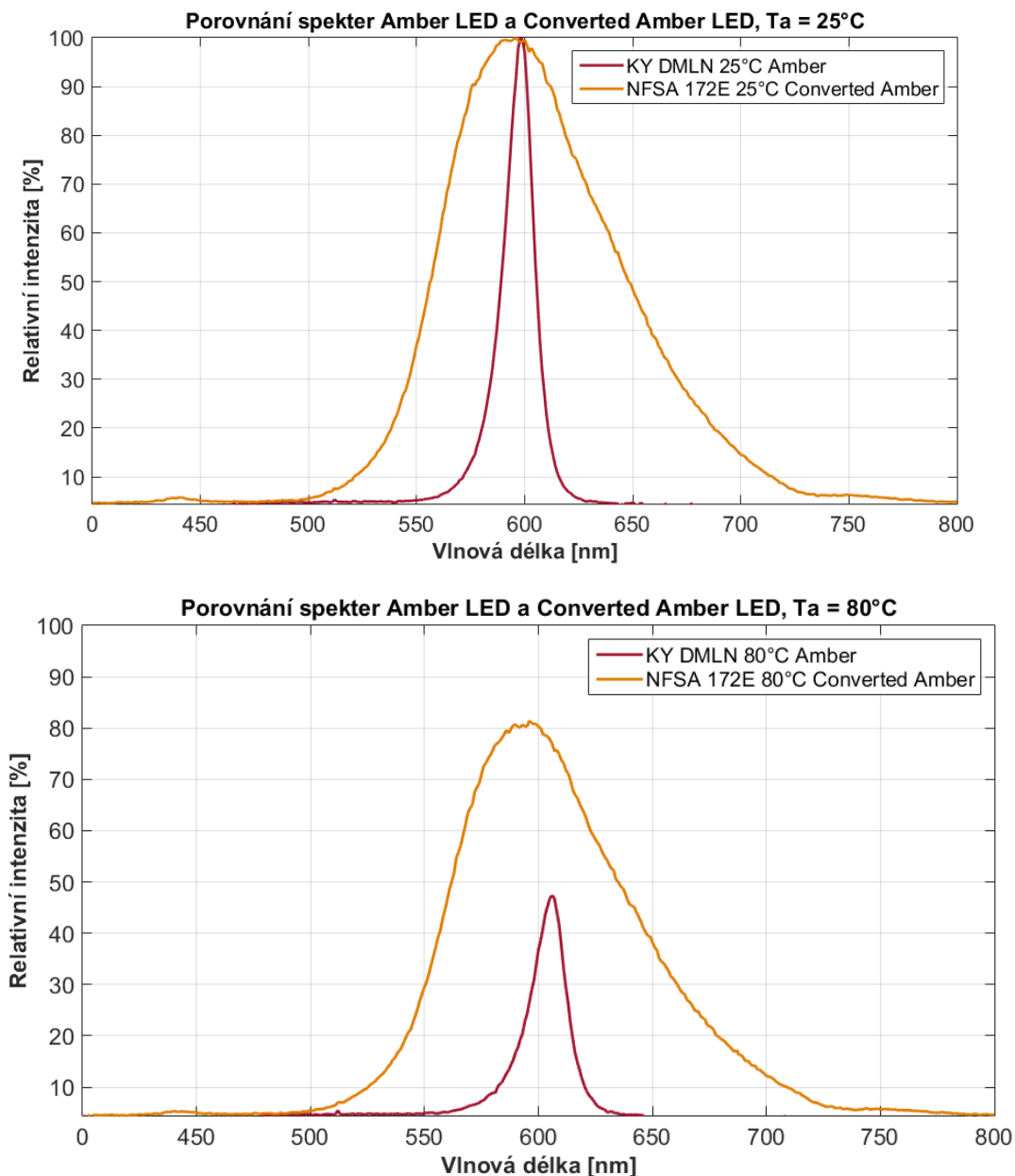
Obrázek 1.23: Spektrální charakteristiky absorpce filtrů.

Zde v následujících grafech (obrázek 1.24) je porovnání vyzařovaných spekter všech barevných LED, kde vidíme pokles jejich vyzařované intenzity z důsledku poklesu jejich výkonu způsobené zahřáním na teplotu 80 °C. Zároveň zde vidíme posuny jednotlivých LED a jejich vyzařovaných spekter k vyšším vlnovým délkám zhruba o 15 nm kromě LED NFSA 172E converted amber, která není takhle ovlivněná. V legendě grafu jsou vypsány jednotlivé vrcholy daných LED.



Obrázek 1.24: Porovnání vyzařovaných spekter barevných LED při teplotě LED 25°C a 80°C.

Na obrázku 1.25 je porovnání spekter dvou oranžových LED. Obyčejná oranžová LED má P-N přechod vyrobený z materiálu AlInGaP, který se používá pro výrobu LED s vlnovou délkou o rozsahu 590 - 640 nm (oranžové odstíny). Zatímco u fosforem konvertované oranžové LED se využívá jako základ modrá LED, na kterou je použit speciální fosfor na konverzi modrého záření na oranžovou barvu. Pozůstatek modrého záření můžeme vidět na nepatrném vrcholu okolo 440 nm v grafu.

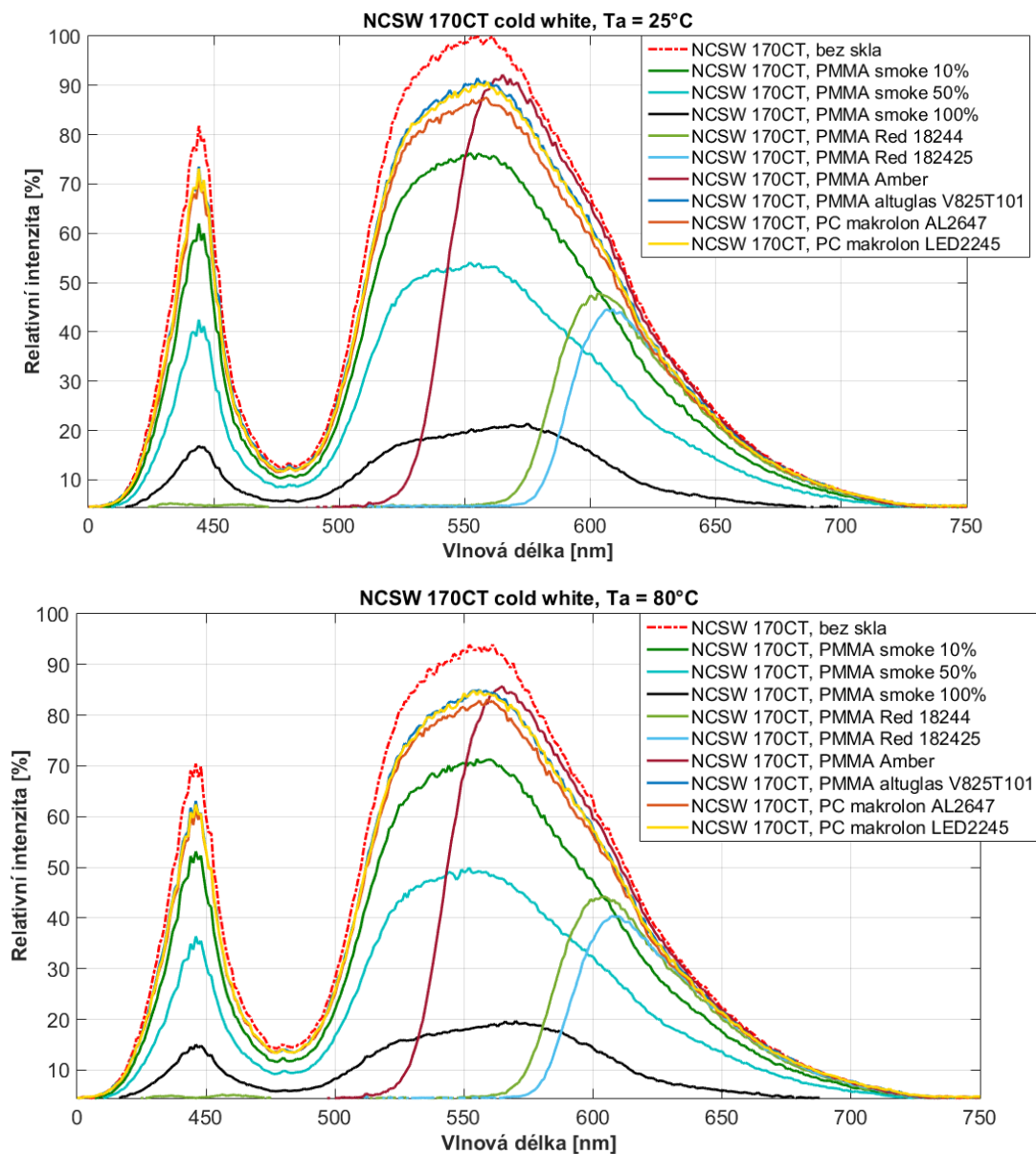


Obrázek 1.25: Graf spekter oranžových LED

Bílé LED

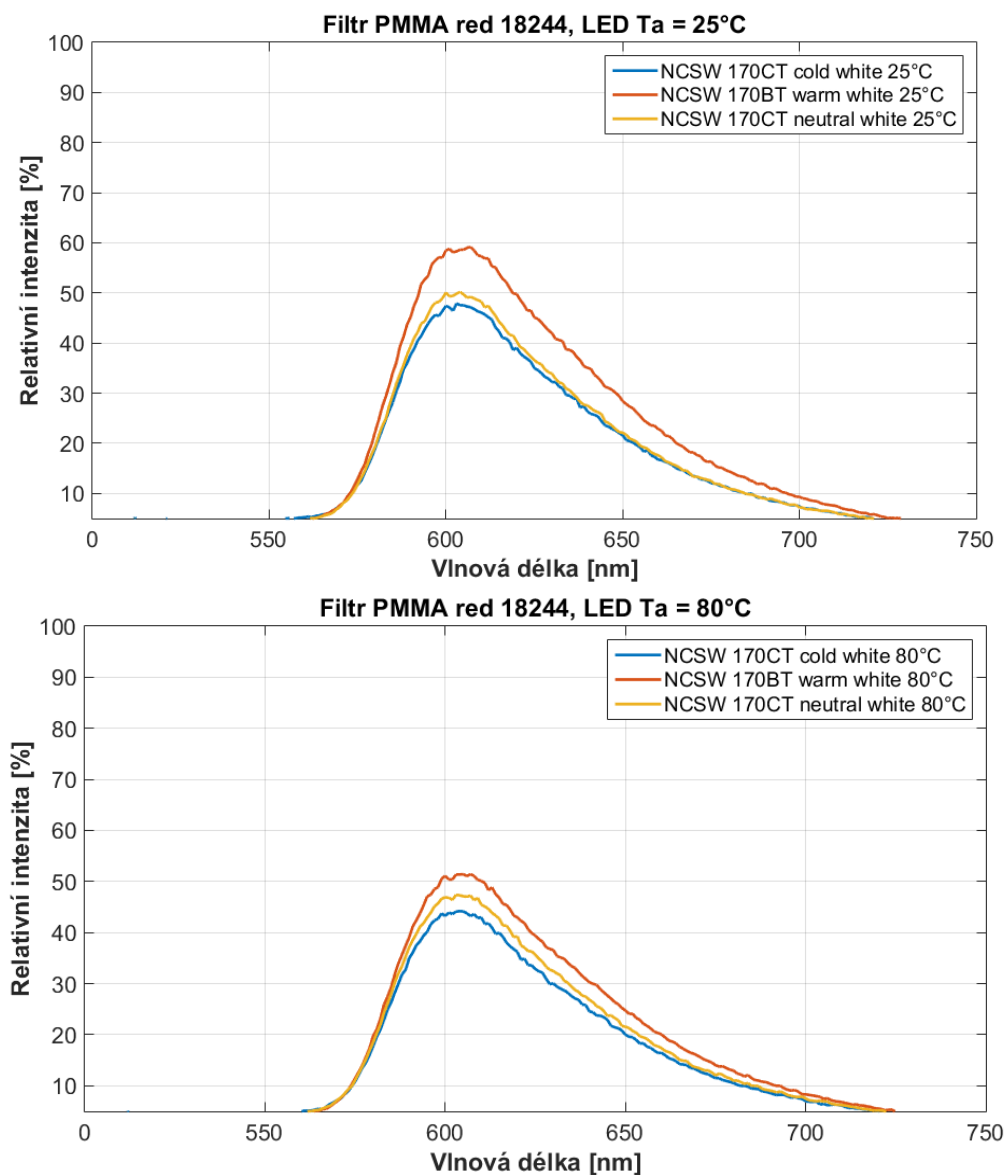
Měřená LED s označením NCSW 170CT Cold white o vyzařované vlnové délce 400 - 750 nm, barva studená bílá, při stálém pracovním proudu $I_f = 1000 \text{ mA}$ a dvou různých teplotách 25 °C a 80 °C.

Z grafů na obrázku 1.26 je vidět, že dané LED klesne intenzita záření zhruba o 5 - 10 % při teplotě 80 °C. A posun jejího vyzařovaného spektra je téměř neznamatelný. Barevné filtry pohltily veškeré modré záření bílé LEDky a přeměnily spektrum podle jejich barvy.



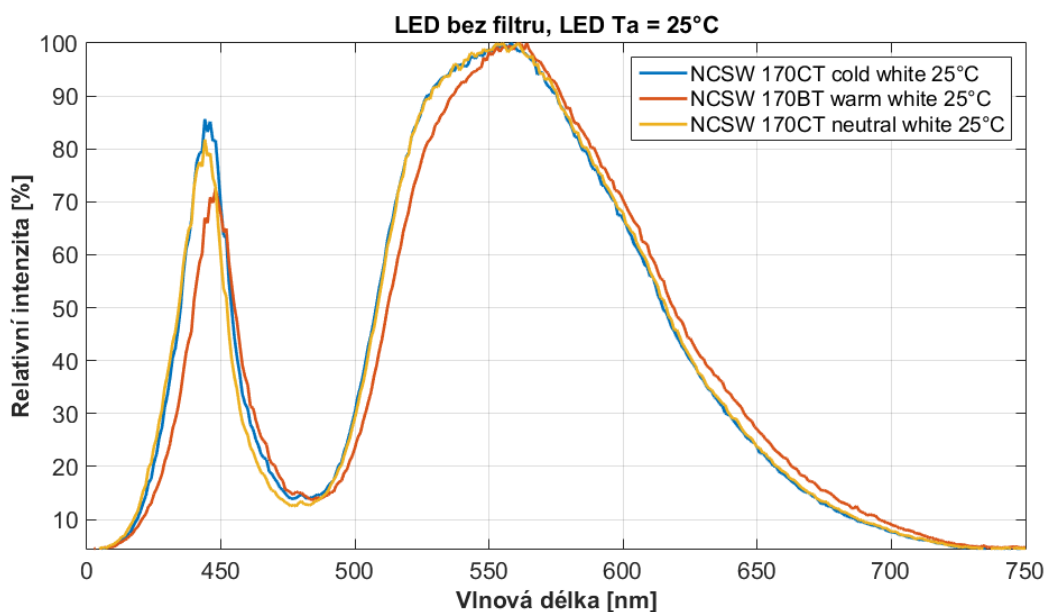
Obrázek 1.26: Spektrální charakteristiky absorpcí filtrů.

Na obrázku 1.27 je porovnání bílých LED svítících přes červený PMMA filtr při teplotě LED 25 °C a 80 °C. Kde můžeme vidět úbytky intenzit jednotlivých LED při vyšší teplotě. Největší úbytek intenzity má LED NCSW 170BT warm white a to zhruba o 10 %, zatímco zbylé dvě LEDky mají úbytek 3-5 % na intenzitě.



Obrázek 1.27: Porovnání spekter bílých LED svítících přes červený filtr.

Na obrázku 1.28 se nachází srovnání spekter cold, warm a neutral white barev LED, při teplotě 25 °C bez filtru.



Obrázek 1.28: Porovnání spekter bílých LED

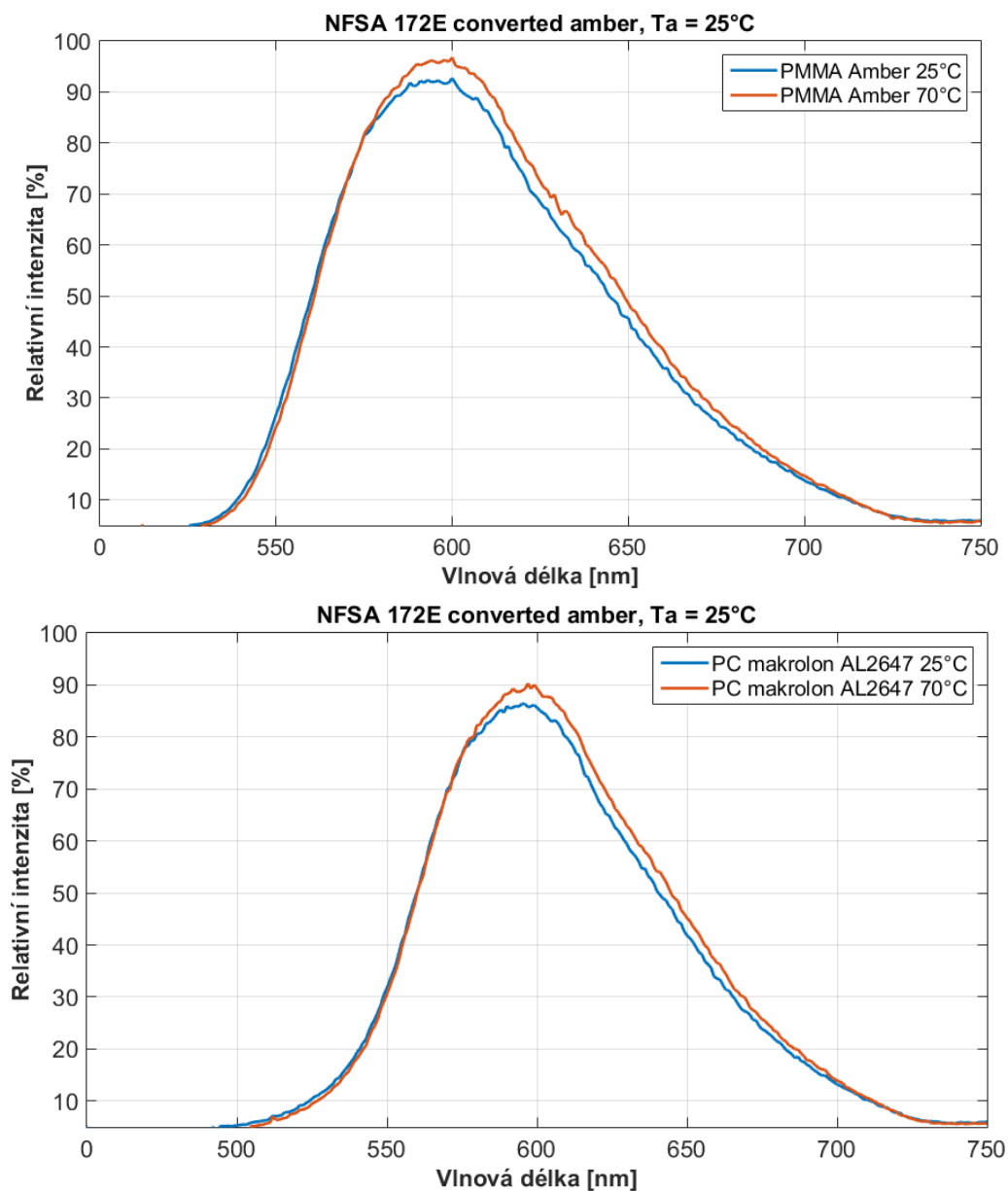
5.2.2 Měření vlivu teploty na spektrální propustnost materiálu (PMMA, PC)

Měření probíhalo při teplotě LED 25 °C a materiál se zahřál na teplotu 70 °C. Z teorie vyplývá, že index lomu materiálu s rostoucí teplotou klesá, což by mělo mít za následek, že materiál bude lépe propouštět světelné záření, tudíž by se měla vyzařovaná intenzita při vyšší teplotě materiálu o něco zvětšit.

Barevné LED

Měřená LED s označením NFSA 172E o vyzařované vlnové délce 610 nm, barva amber, při stálém pracovním proudu $I_f = 150$ mA, stálé teplotě 25 °C a teplotě materiálů 25 °C a 70 °C. Měření probíhalo v zatemněné místnosti pomocí spektrometru Red Tide USB650 a obslužného programu Spectra suite.

Na obrázku 1.29 jsou dva grafy konvertované amber LED svítící přes PMMA a PC filtr. Při zahřátí filtrů na 70 °C lze vidět nárůst intenzity vyzařovaného spektra, jelikož index lomu materiálu se stoupající teplotou klesá, tudíž má lepší propustnost a menší absorpci. U PMMA materiálu se zvýšila relativní intenzita dané LED o zhruba 5 %, zatímco u PC materiálu to bylo zhruba o 3 %.

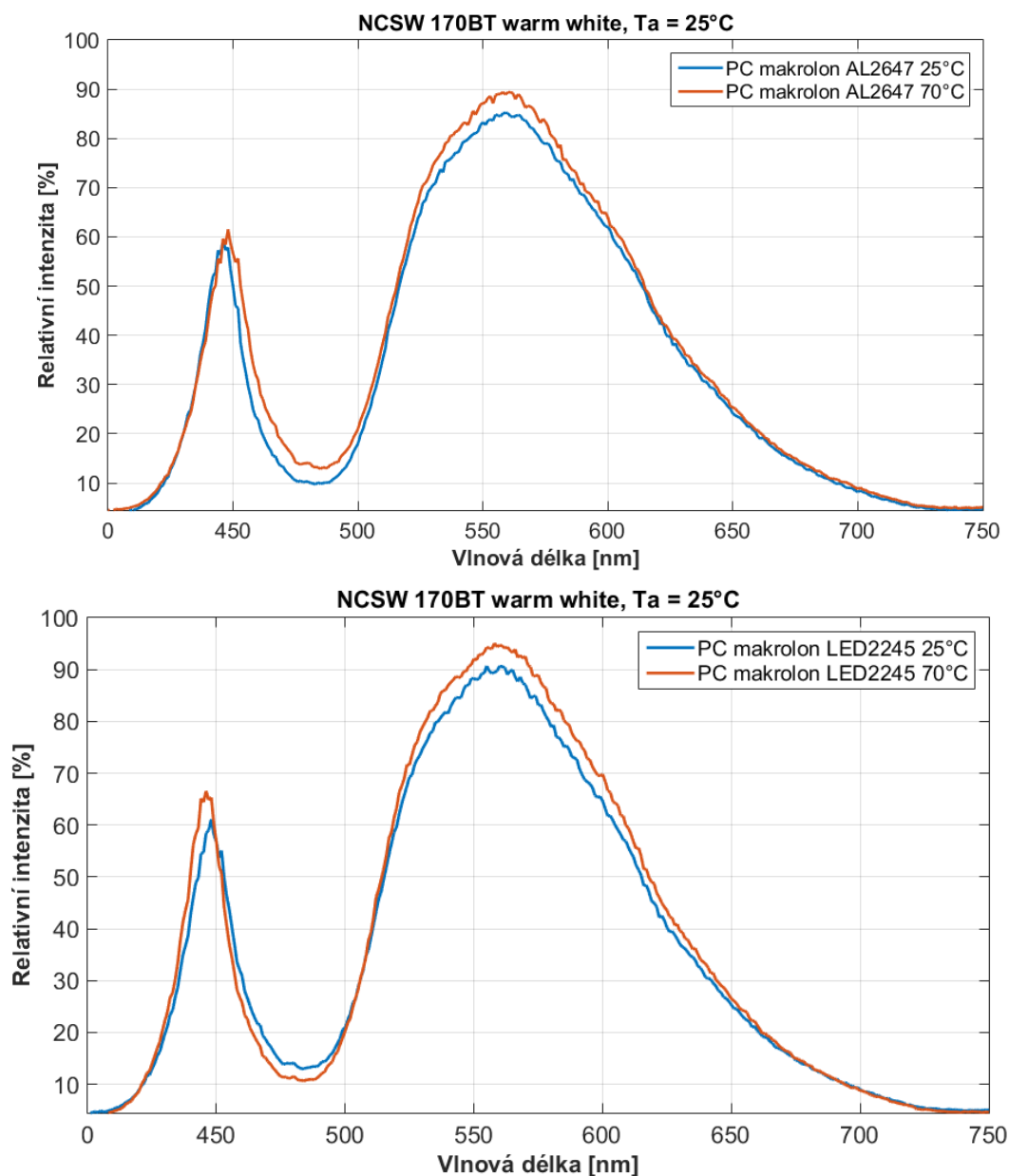


Obrázek 1.29: Grafy spektrální propustnosti materiálu v závislosti na jeho teplotě.

Bílé LED

Měřená LED s označením NCSW 170BT Warm white o vyzařované vlnové délce 400 - 750 nm, barva teplá bílá, při stálém pracovním proudu $I_f = 1000 \text{ mA}$ a teplotě 25°C . Pro dva různé PC materiály o teplotě 25°C a 70°C .

Na obrázku 1.30 jsou grafy warm white LED svítící přes dva PC filtry. Materiál Makrolon AL se používá jako skla světlometů a materiál Makrolon LED se využívá ve světlovodech. Z grafu můžeme vidět, že relativní intenzita vyzařovaného spektra dané LED se u obou materiálů zvýšila o přibližně 5 % pro vyšší teplotu materiálu.



Obrázek 1.30: Grafy spektrální propustnosti materiálu v závislosti na jeho teplotě.

Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o viditelném spektru elektromagnetického záření, jeho vlastnostech a chování při průchodu prostředími. Zabývá se základními pojmy optiky pro popis optického prostředí a popis spektra elektromagnetického záření. Popisuje LED technologie jako zdroje záření pro využití v osvětlovací technice a dalších technologiích. Jsou zde popsány plastové materiály PMMA a PC vzhledem k jejich optickým a materiálovým vlastnostem pro využití ve výrobě předních a zadních automobilových světlometů a optických prvků jako jsou světlovody. Dále se věnuji metodám spektrální analýzy a popisu funkce a principu spektrometru.

LED technologie má v budoucnosti široké využití ve všech odvětvích průmyslu spojených s osvětlováním, od obyčejných LED žárovek pro domácí využití až po výkonové LED používané v automobilovém průmyslu pro světlomety. Právě nyní se začíná LED technologie více a více prosazovat ve světlometech automobilů oproti obyčejným halogenovým žárovkám, hlavně z důvodu nižší spotřeby a delší životnosti a také umožňuje širší škálu různých nových designových prvků a technologií.

V praktické části jsem se zabýval měřením spekter daných LED a zjišťoval jsem, jak se bude měnit jejich spektrum při dvou různých teplotách LED a také při dvou různých teplotách materiálů. V prvním měření jsem měřil pro teploty LED 25 °C a 80 °C. U barevných LED byl znatelný jejich pokles relativní intenzity při vyšší teplotě v některých případech až o více než polovinu. LED KY DMLN31.23 byla nejvíce ovlivněna teplotou a její intenzita klesla o 55 %, zatímco pro LED KR DMLN31.23 to bylo o 30 % a u LED KS DMLQ31.23 a LED NFSA 172E se jednalo o 20 - 25 %. Zároveň se jejich spektra posunuly k vyšším vlnovým délkám. Pro LED KY DMLN31.23 to činilo 16 nm, LED KR DMLN31.23 se posunulo spektrum o 12 nm a u LED KS DMLQ31.23 to bylo o 8 nm. U bílých LED se jejich intenzita snížila o 5 - 10 % a posun jejich vyzařovaného spektra je nepatrný. V druhém měření jsem měřil při teplotě LED 25 °C a dvou teplotách materiálu 25 °C a 70 °C. Z grafů je vidět, že při vyšší teplotě materiálu je relativní intenzita záření o něco vyšší. Je to způsobeno tím, že s rostoucí teplotou klesá index lomu materiálu. Při obou měřeních mohla nastat chyba měření z důvodu nečistot a povrchových nedokonalostí na daných materiálech nebo z důvodu denního světla, které nebylo možné kompletně eliminovat.

Použitá literatura

- [1] Index lomu. Wikiskripta [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Index_lomu_sv%C4%9Btla
- [2] Odraz a lom světla. Fyzika007 [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/optika/odraz-a-lom-svetla>
- [3] Odraz a lom světla. Gymhol [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/02_odraz_a_lom/02_odraz.htm
- [4] Úplný odraz. Encyklopedie Fyziky [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/440-uplny-odraz-svetla>
- [5] Optické hranoly. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/442-opticke-hranoly>
- [6] Emise a absorpce světla. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>
- [7] Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování. Praha: FCC Public s. r. o. ISSN 1212-0812
- [8] K.V.S.S.S.SAIRAM. Optical Communications. LAXMI PUBLICATIONS (P) LTD, 2007.
- [9] VLIV TEPLoty PŘECHODU NA PROVOZNÍ PARAMETRY A ŽIVOTNOST VÝKONNÝCH MODULŮ LED. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT.
- [10] LED binning explained. Eadphic scientific [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.edaphic.com.au/knowledge-base/articles/light-articles/led-binning-explained/>
- [11] LED binning. Led corporations [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://ledcorporations.com/led-technology/led-binning/>
- [12] Chromacity diagram. Nichia corporation [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: http://www.nichia.co.jp/en/product/led_color.html
- [13] Termoplasty. Koplast [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/ostatni-termoplasty-popis-termoplastu/>
- [14] Polymery. Publi [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [15] ČERVENĚ, Ivan. Fyzika po kapitolách 12: Optika. STU, 2007. ISBN 8022726740

- [16] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Marek BÁLSKÝ, Zdeněk BLÁHA, Zbyněk CARBOL, Daniel DIVIŠ, Blahoslav SOCHA, Jaroslav ŠNOBL, Jan ŠUMPICH a Petr ZÁVADA. Světelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9
- [17] Spektrální analýza. Fyzika007 [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/optika/spektralni-analyza>
- [18] Spektrofotometrie. Wikiskripta [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Spektrofotometrie>
- [19] Optické metody. Mendel university [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=52959
- [20] MALÝ, P. Optika. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013. ISBN 978-80-246-2246-0.
- [21] SKRABAL, Petr. Spectroscopy - An interdisciplinary integral description of spectroscopy from UV to NMR. ETH Zurich: vdf Hochschulverlag AG, 2012 ISBN 978-3-7281-3385-4.

Seznam příloh

Příloha A:	Fotografie z měření	I
Příloha B:	Grafy naměřených hodnot	II

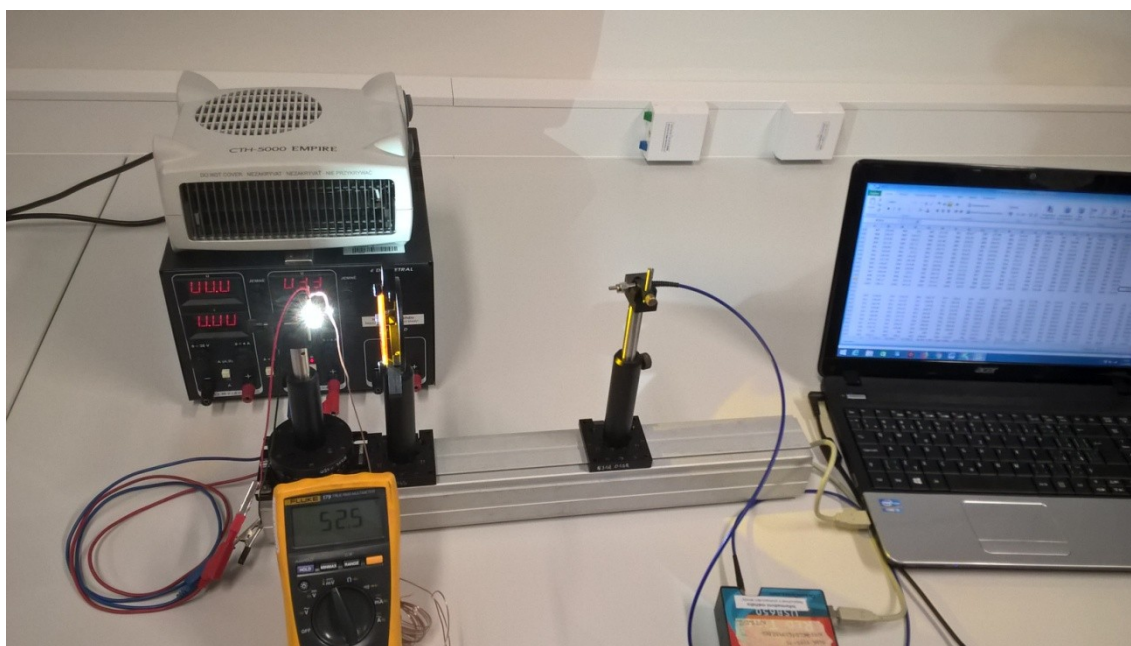
Součástí BP/DP je CD/DVD.

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

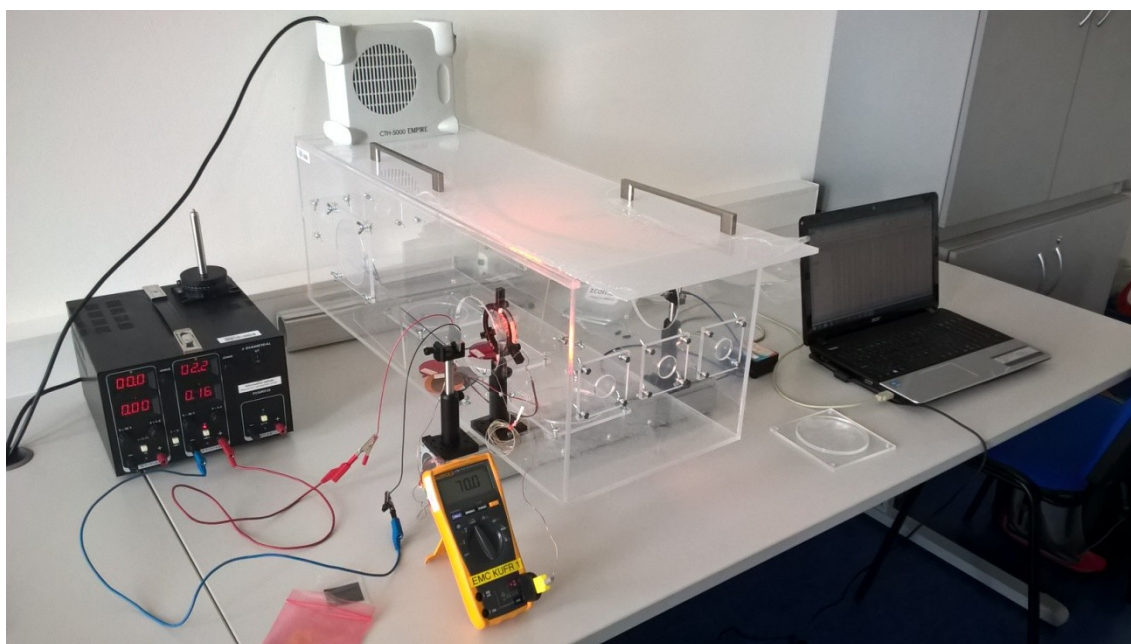
1. Foto z měření
2. Zpracované grafy naměřených hodnot v programu MATLAB

Příloha A: *Fotografie z měření*

Fotografie č. 1 pracoviště pro měření spektra při teplotě LED 25°C a 80°C

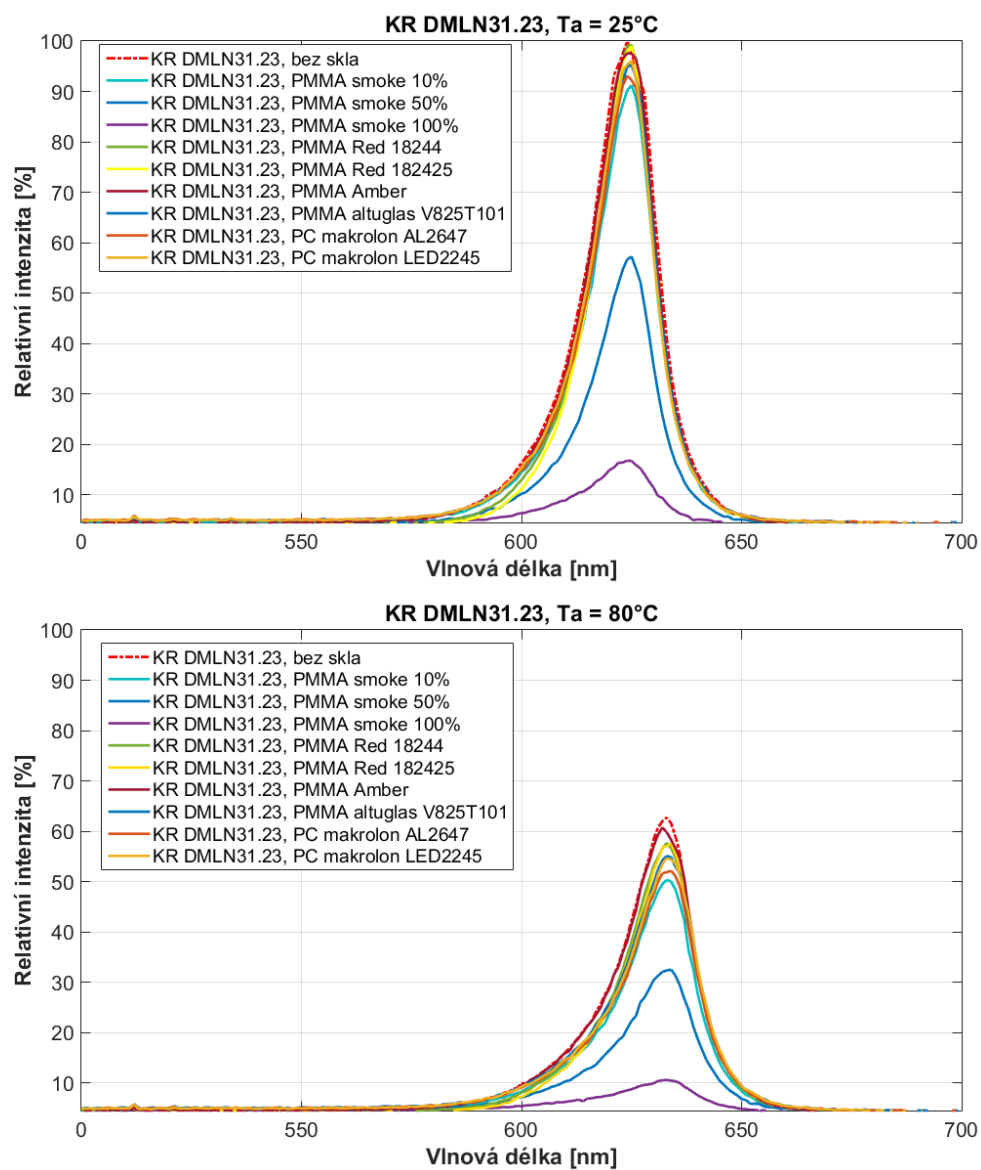


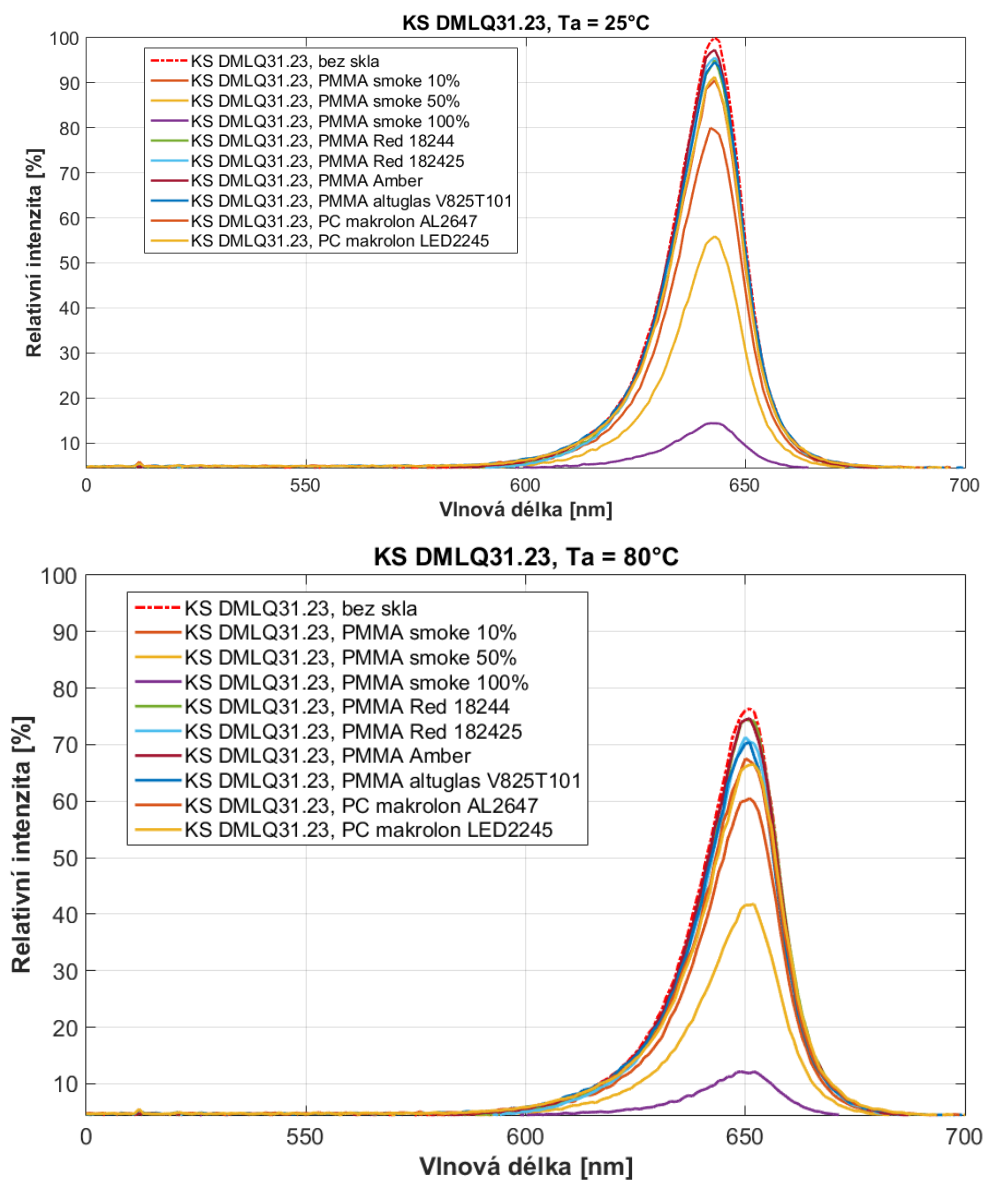
Fotografie č. 2 pracoviště pro měření spektrální propustnosti materiálu při teplotě 70°C

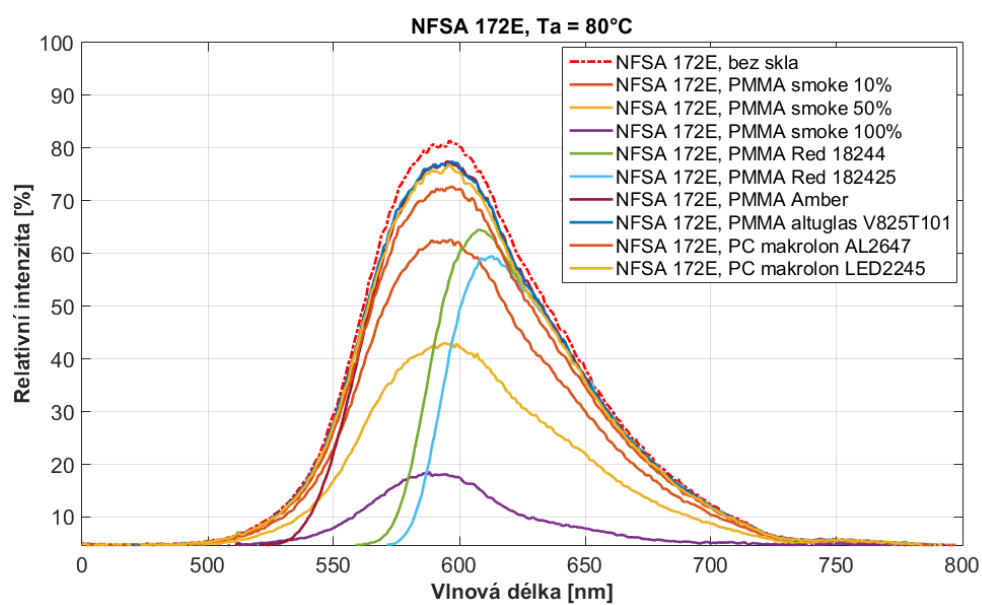
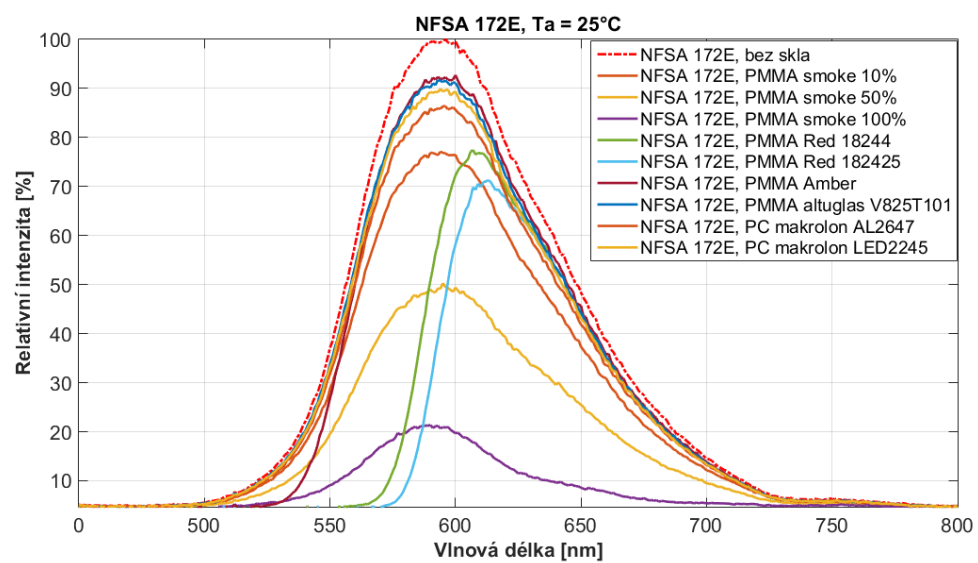


Příloha B: Grafy naměřených hodnot

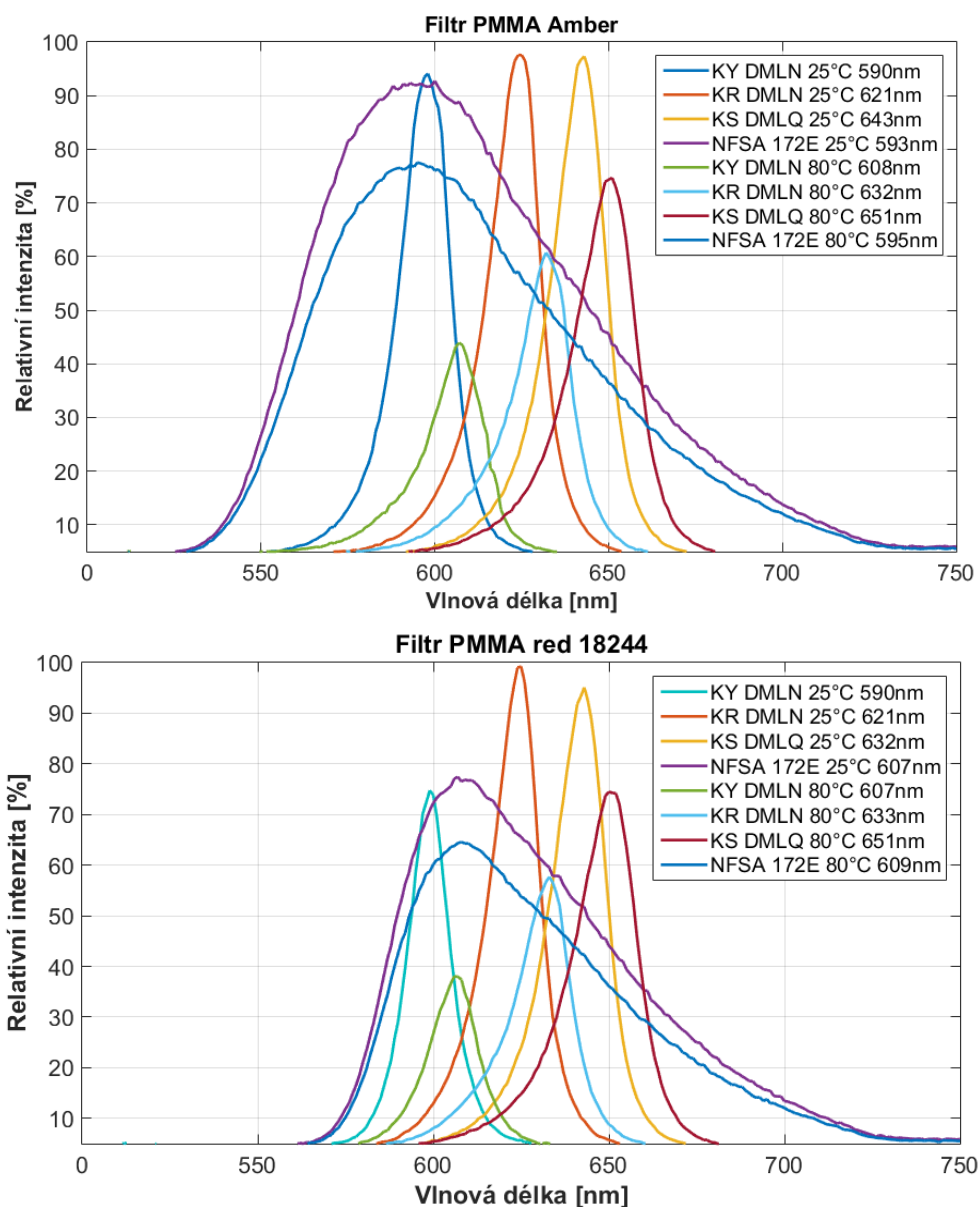
Grafy absorpcí pro barevné LED

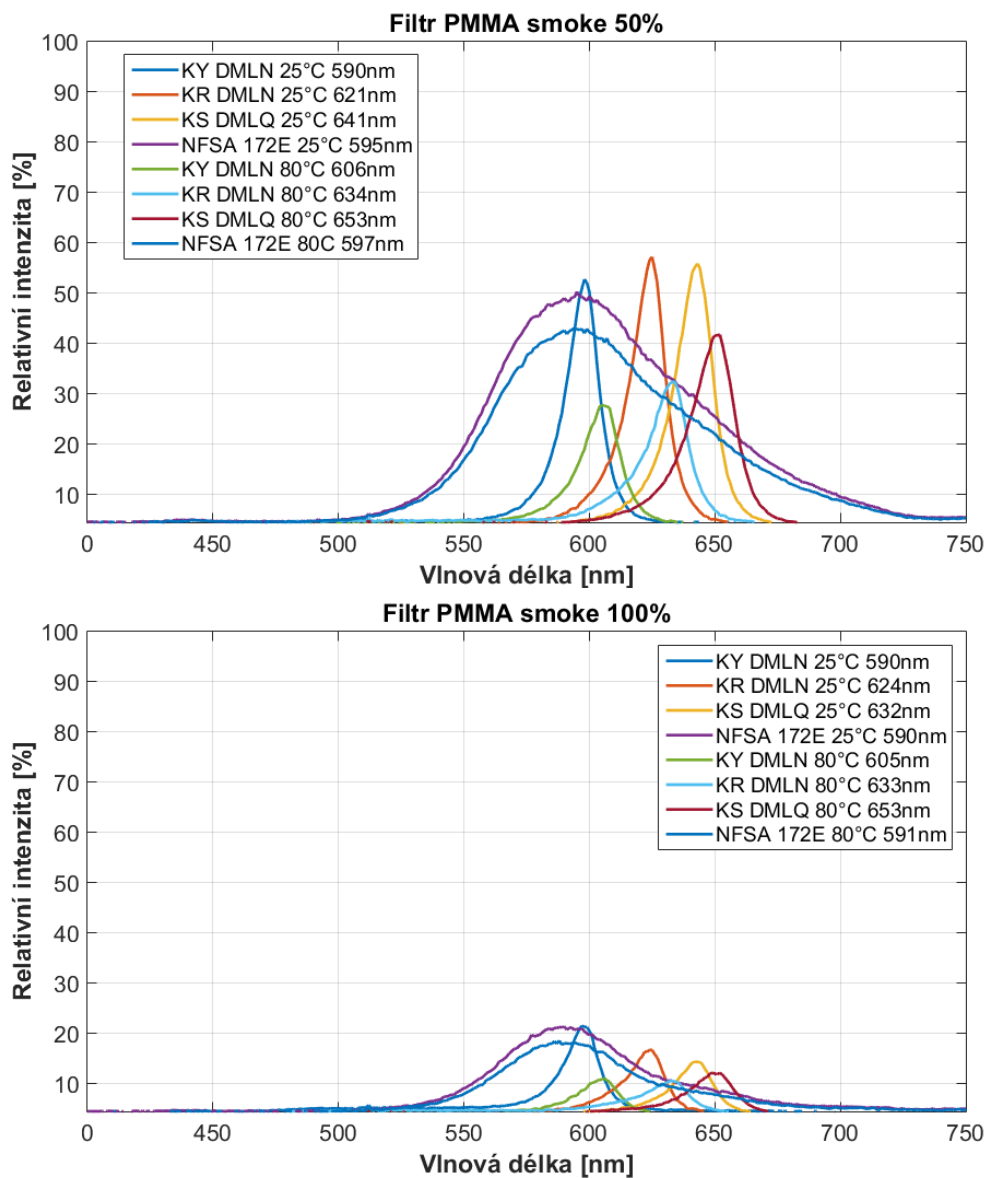




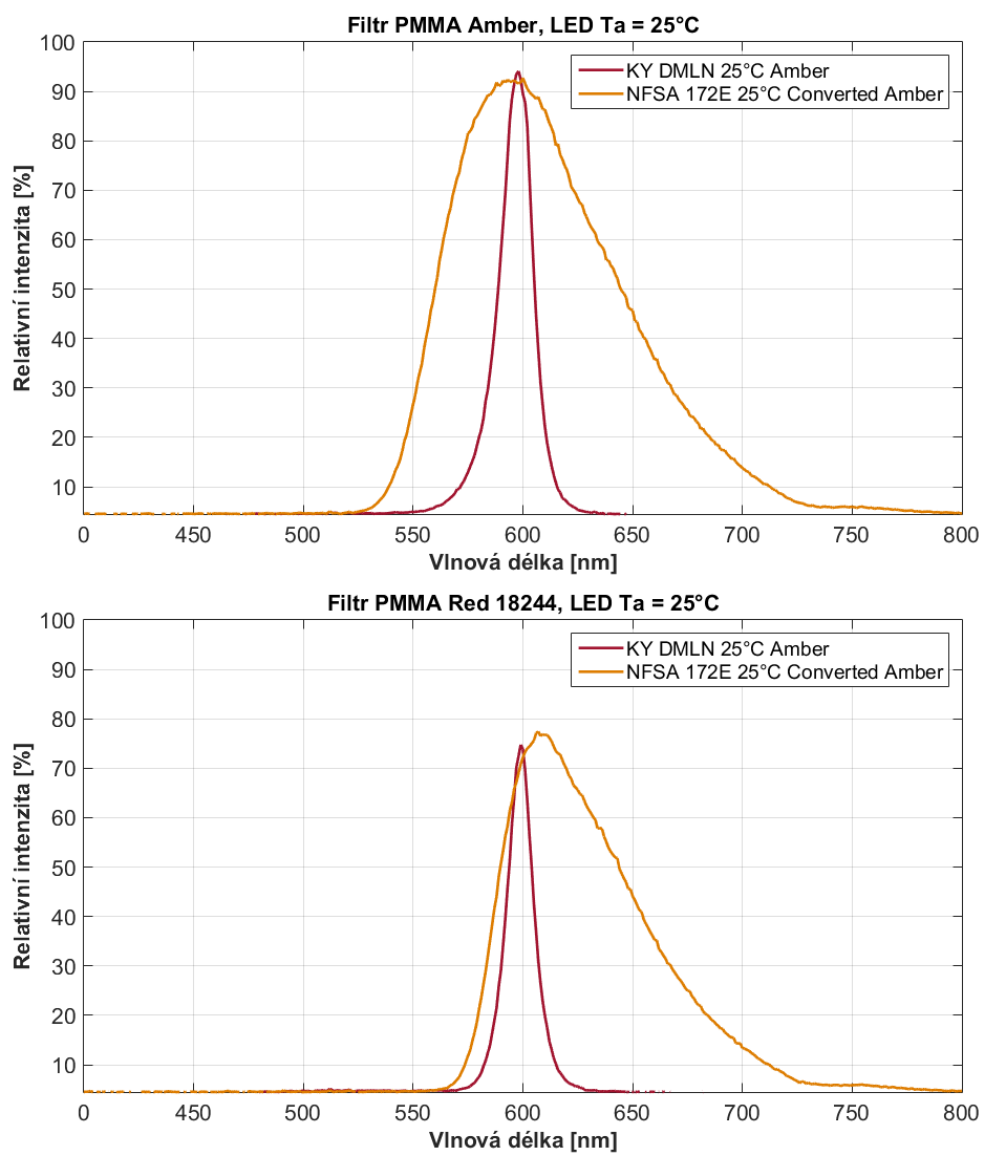


Porovnání všech barevných LED pro vybrané filtry

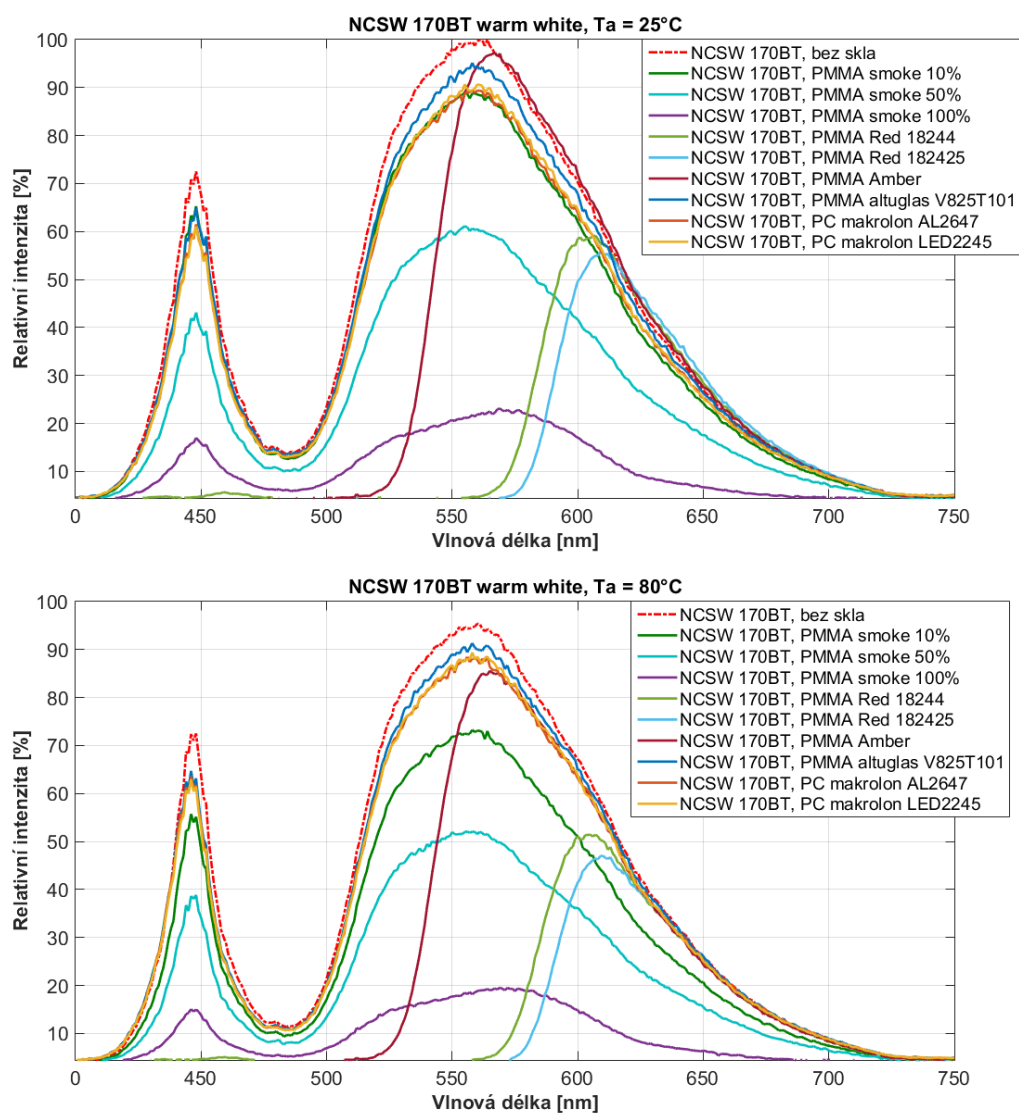


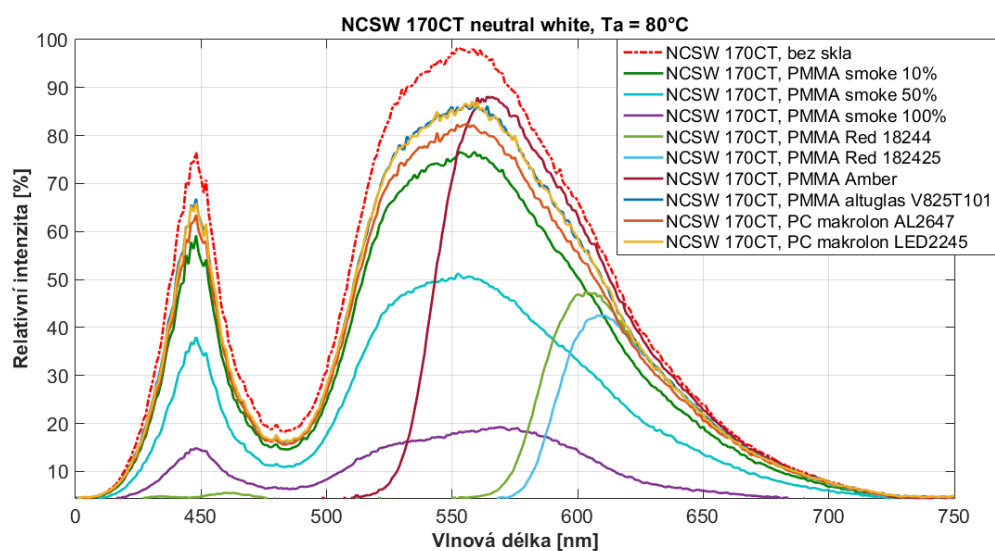
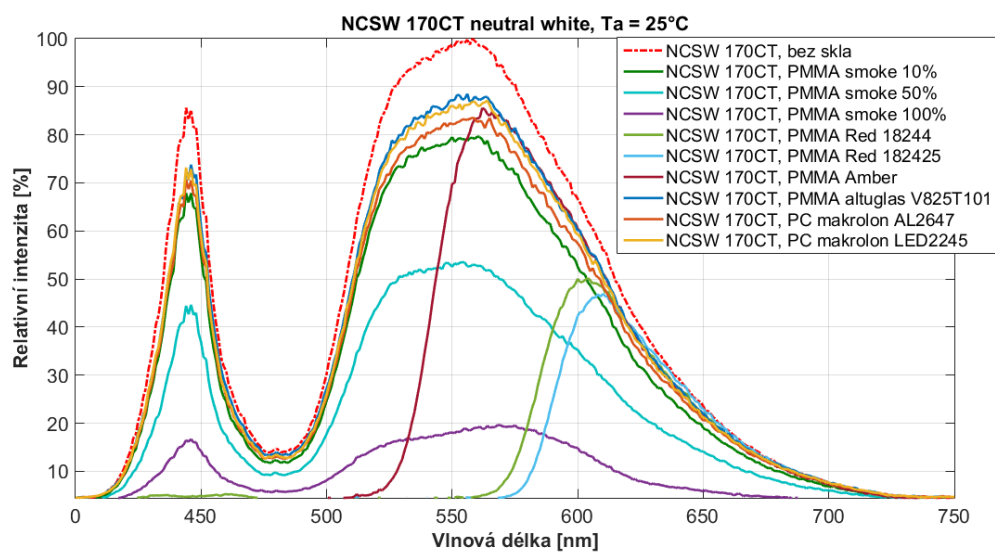


Grafy oranžových LED svítící přes oranžový a červený filtr

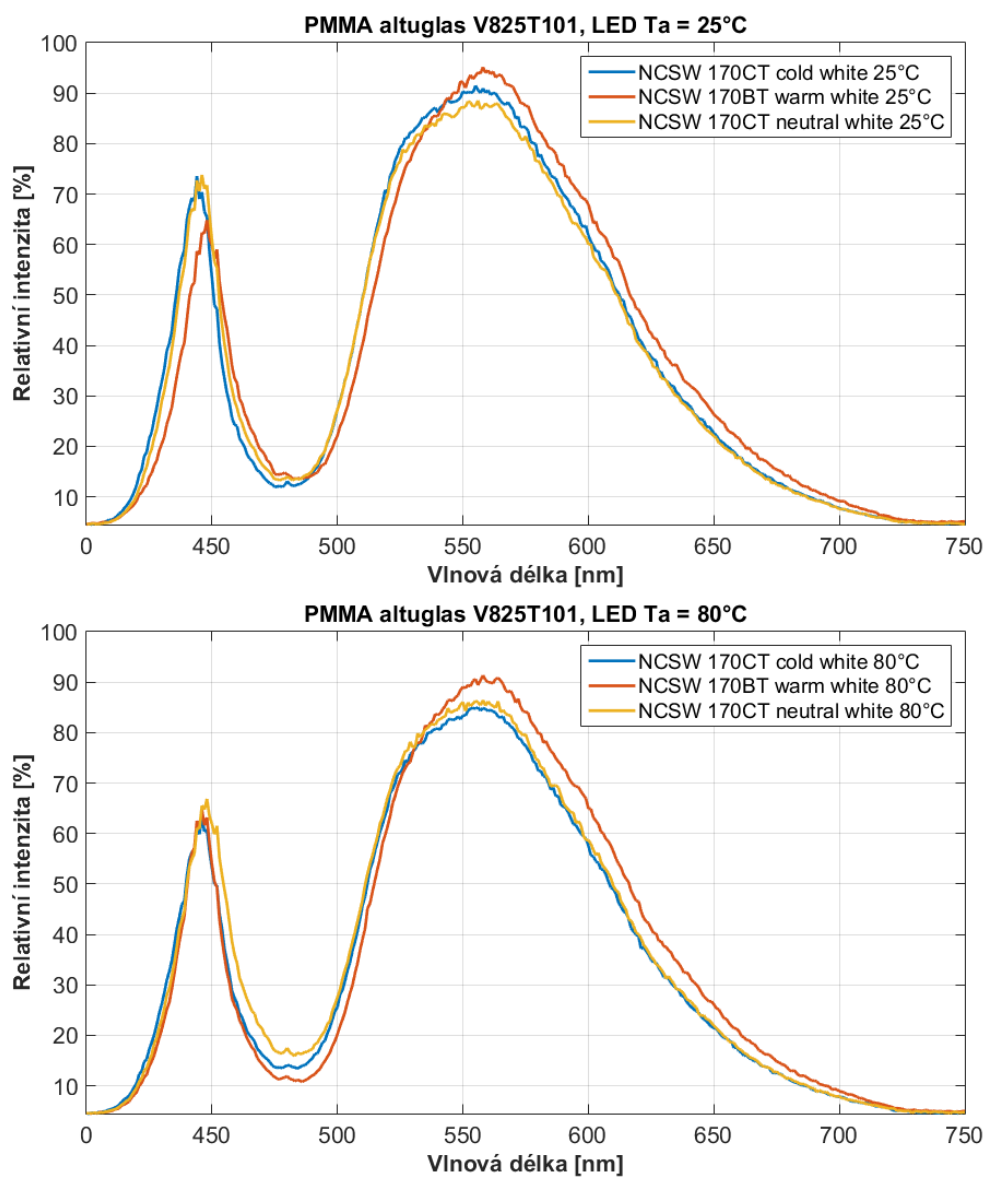


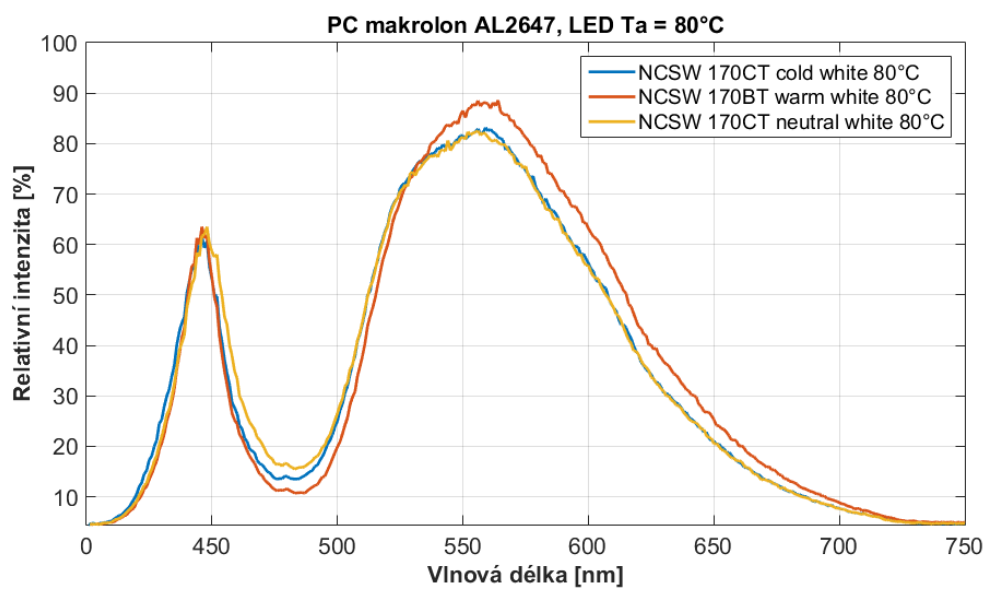
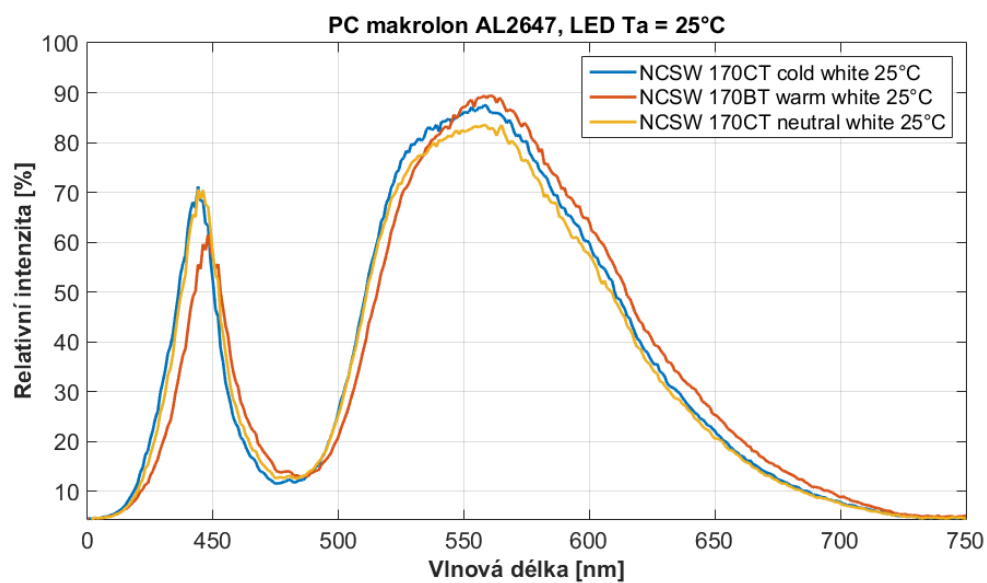
Grafy absorpcí pro bílé LED

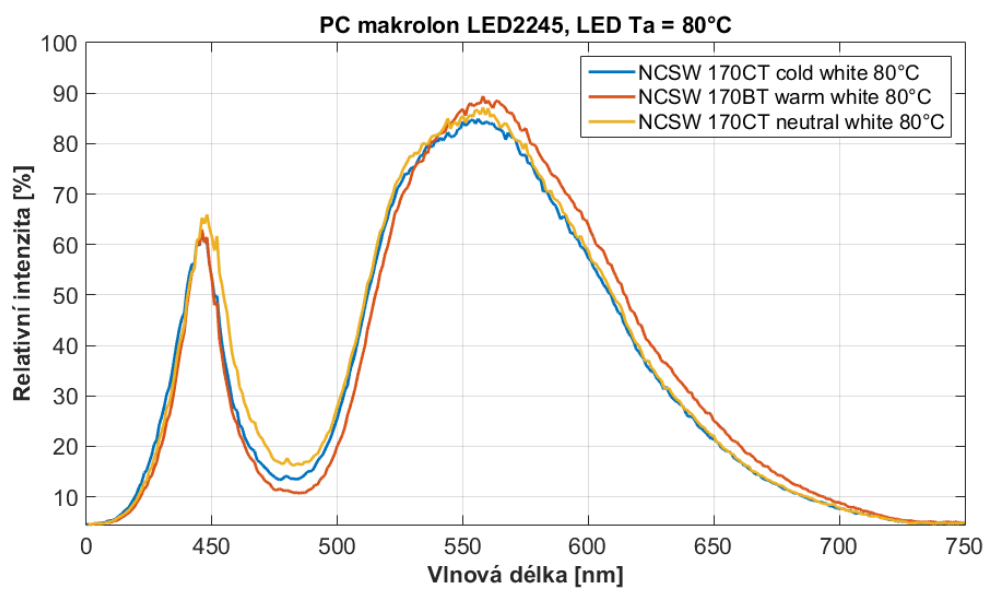
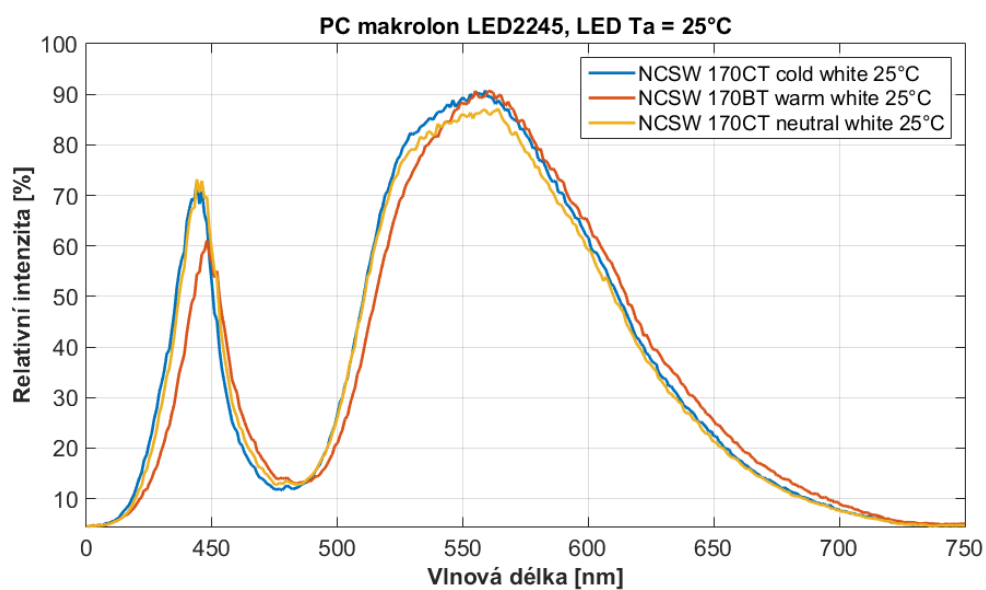


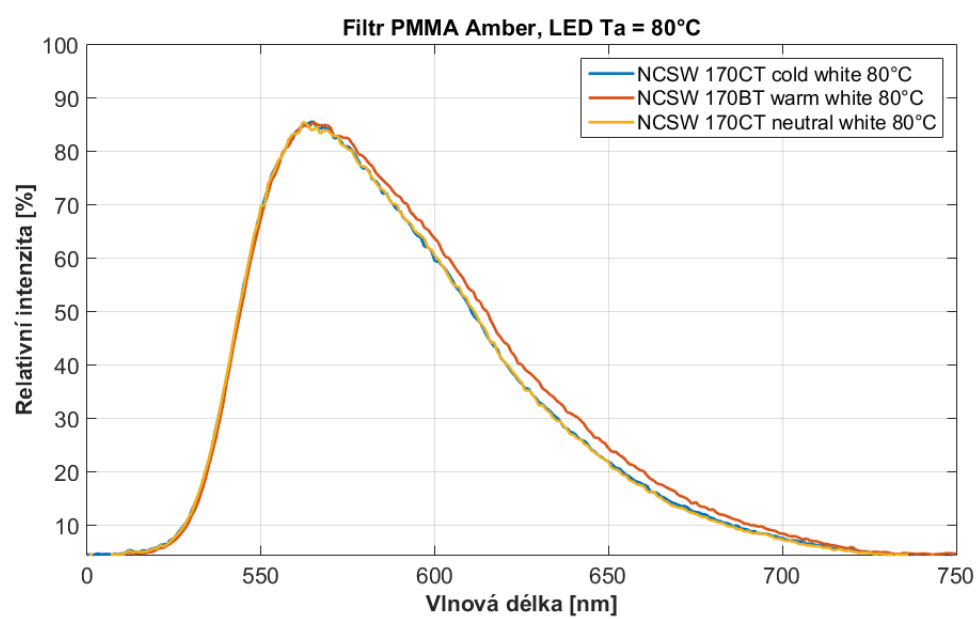
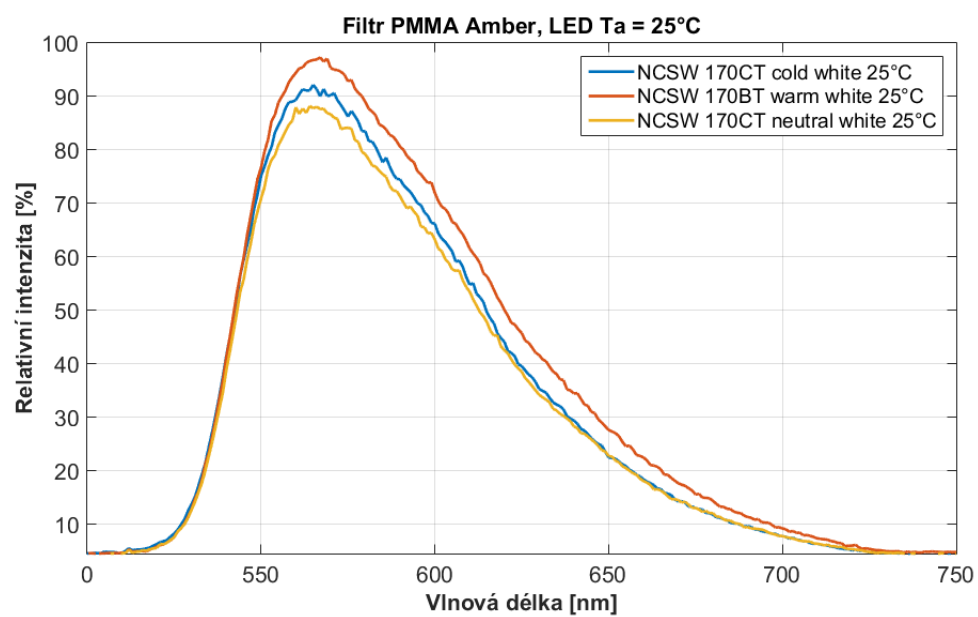


Grafy absorpcí vybraných filtrů pro bílé LED

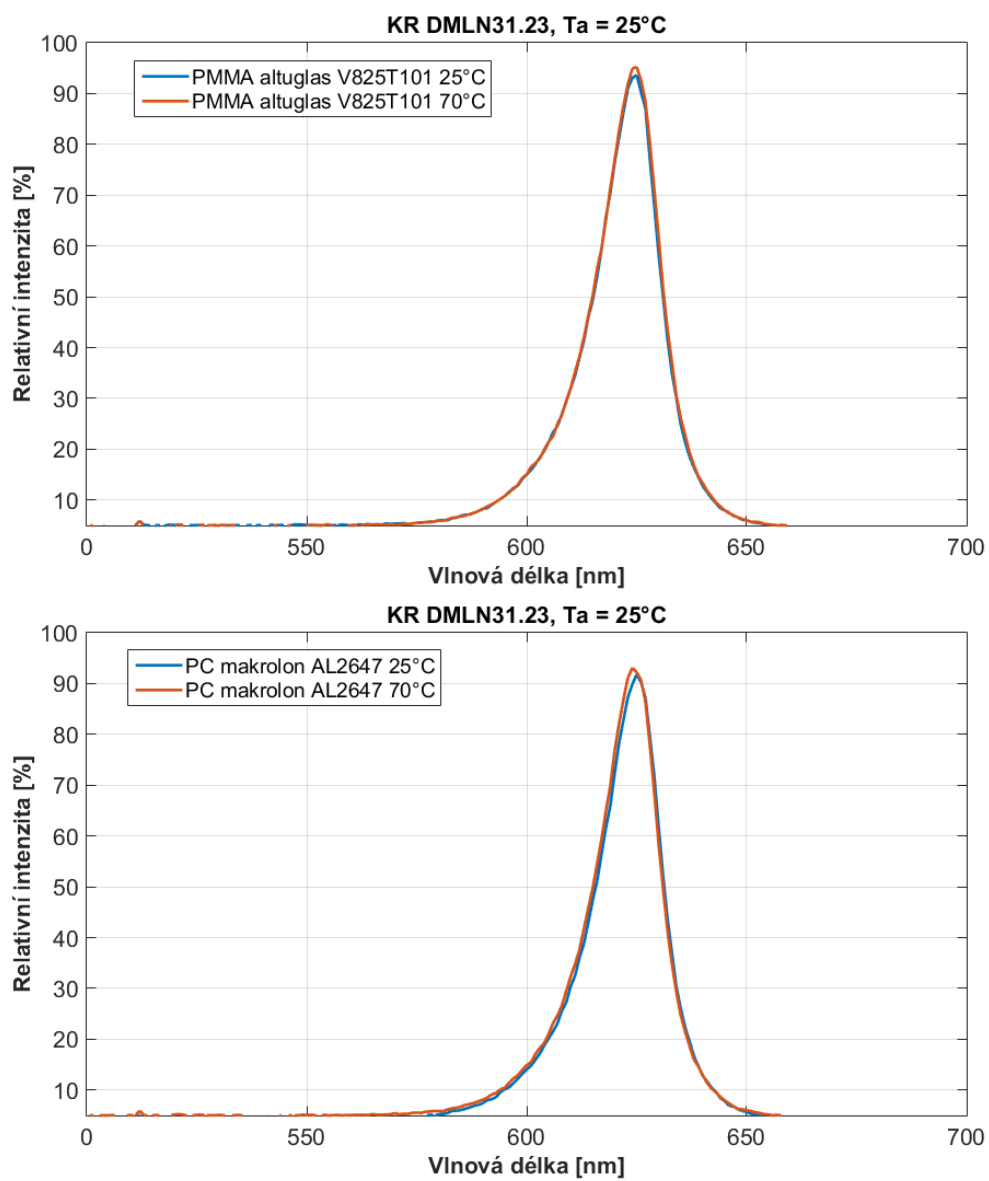


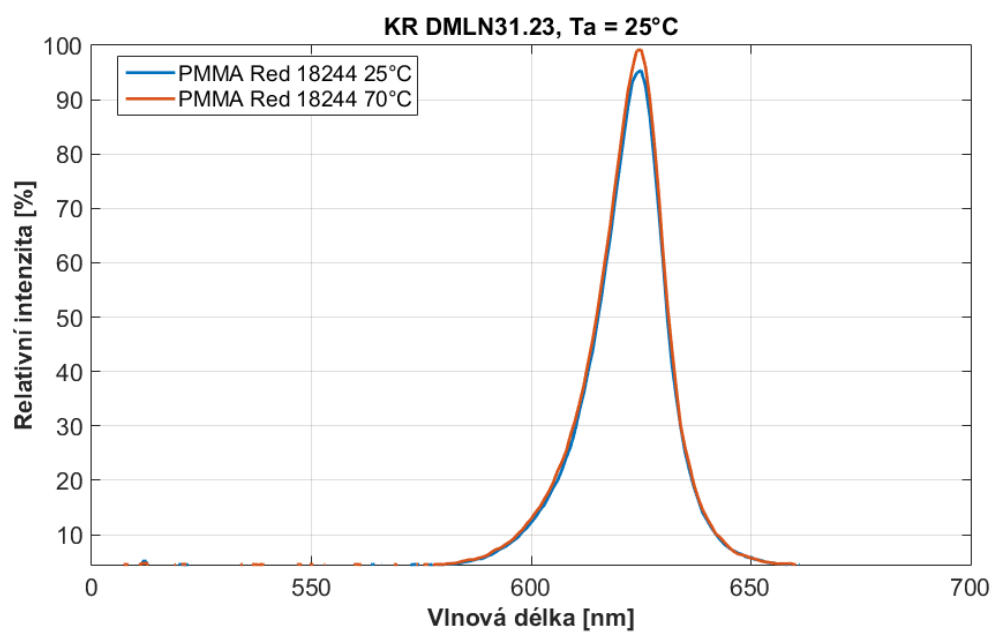
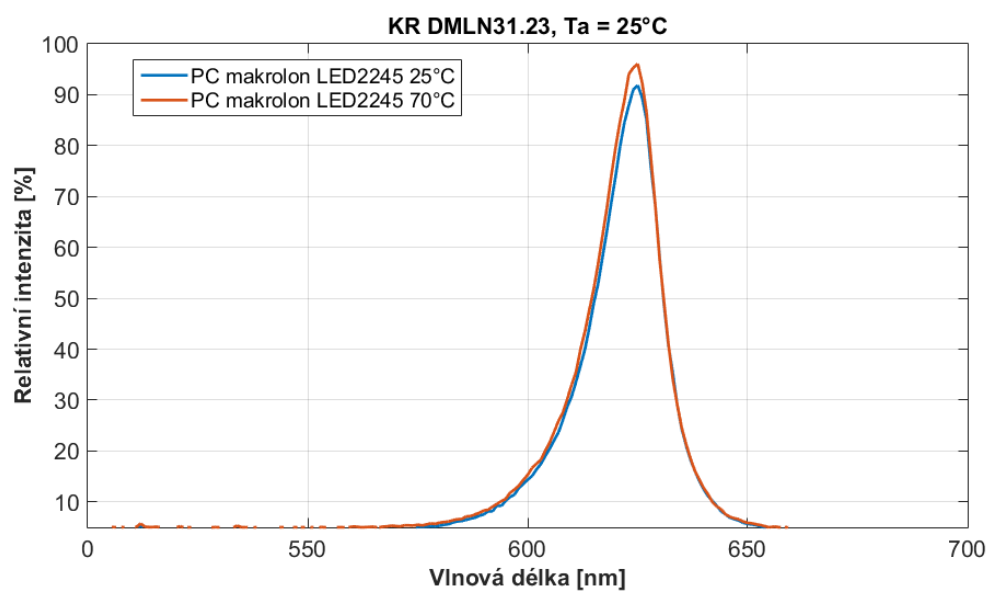


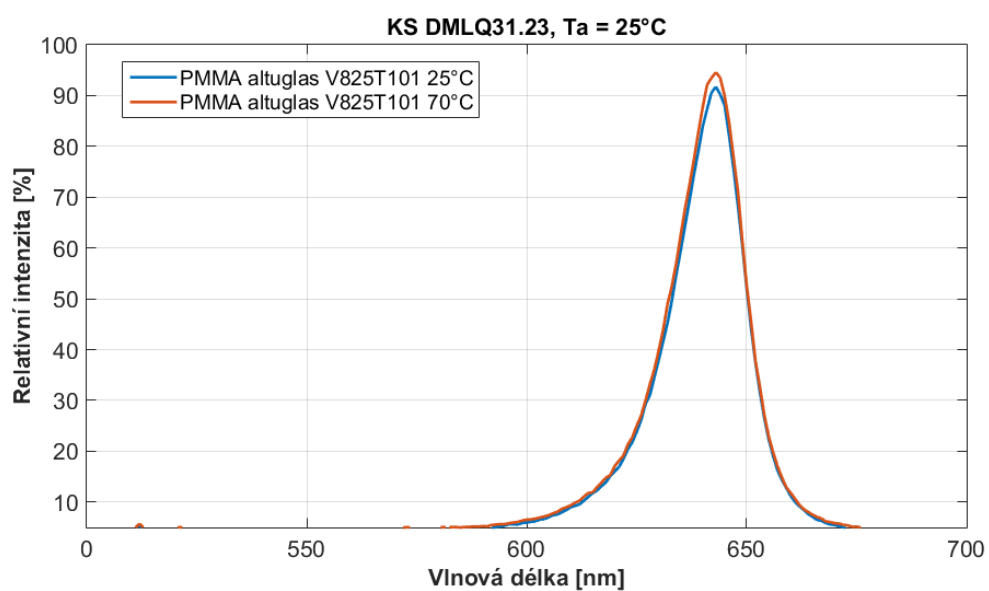
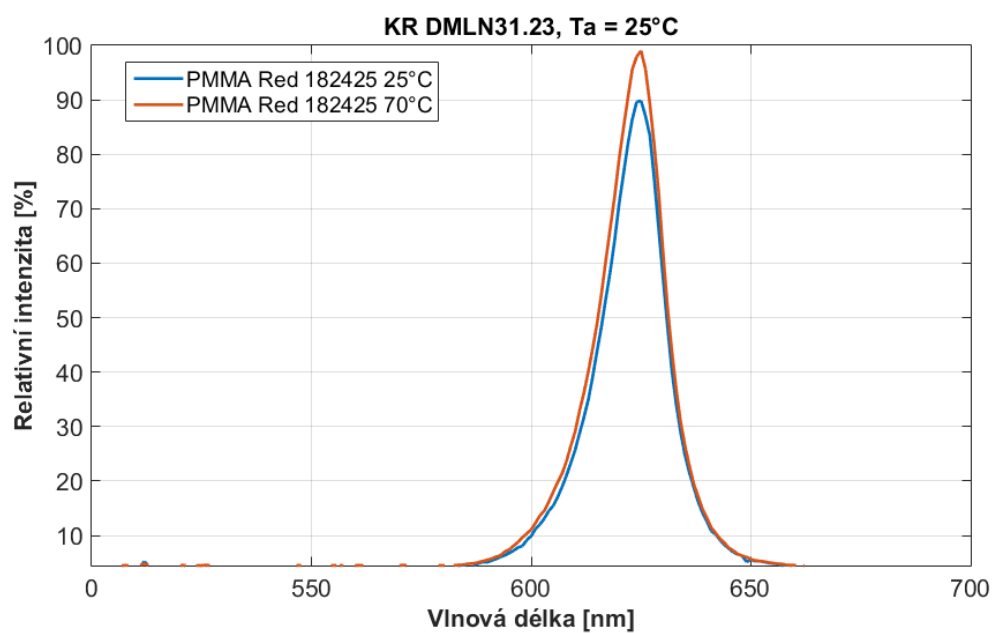


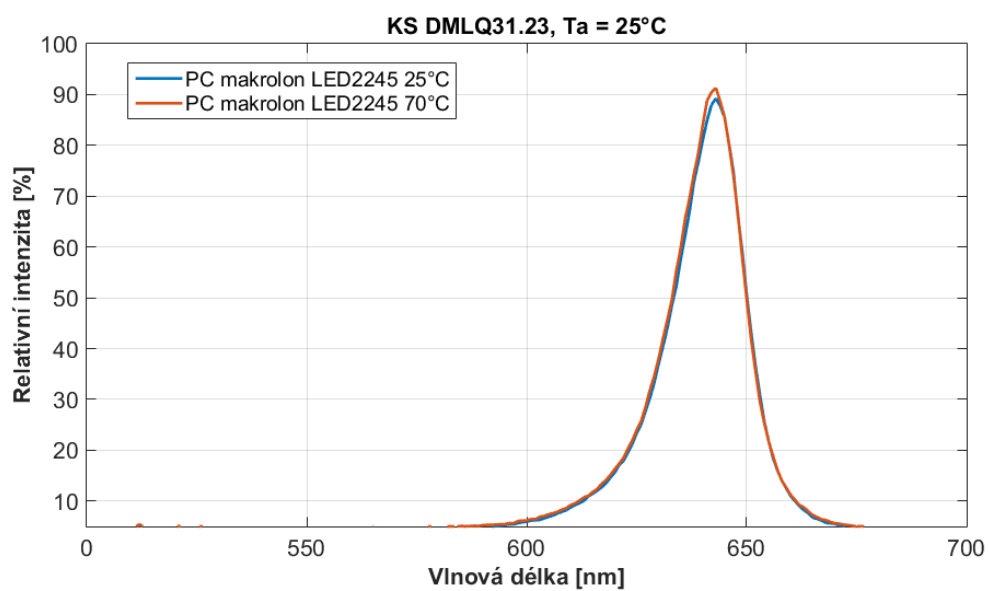
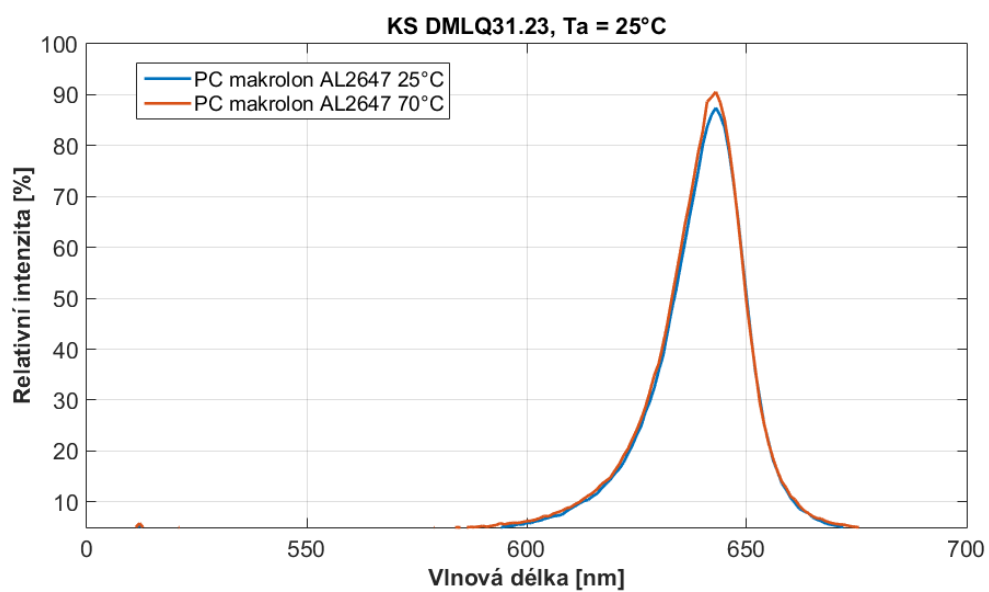


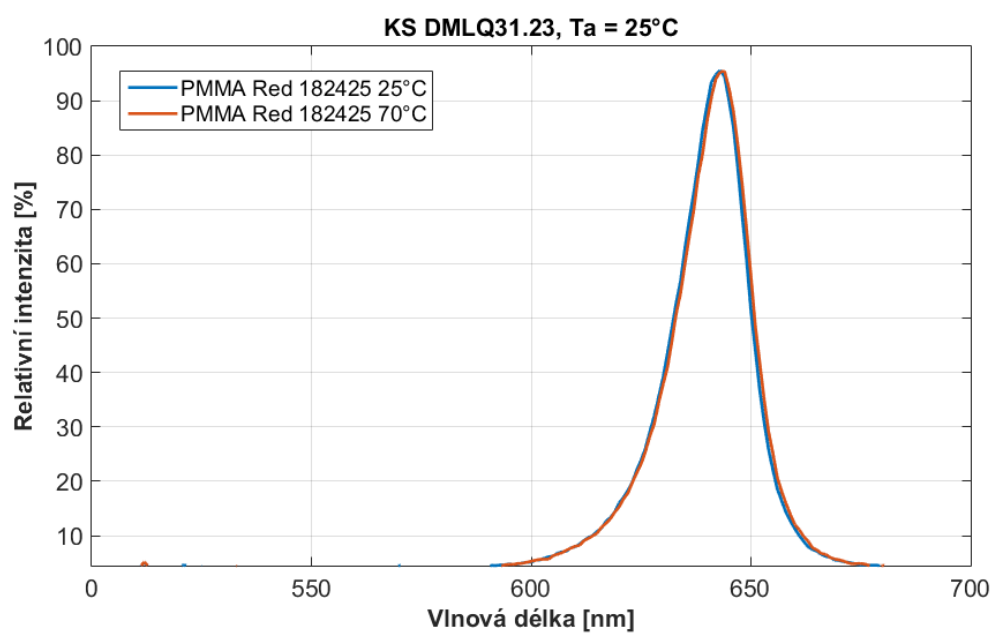
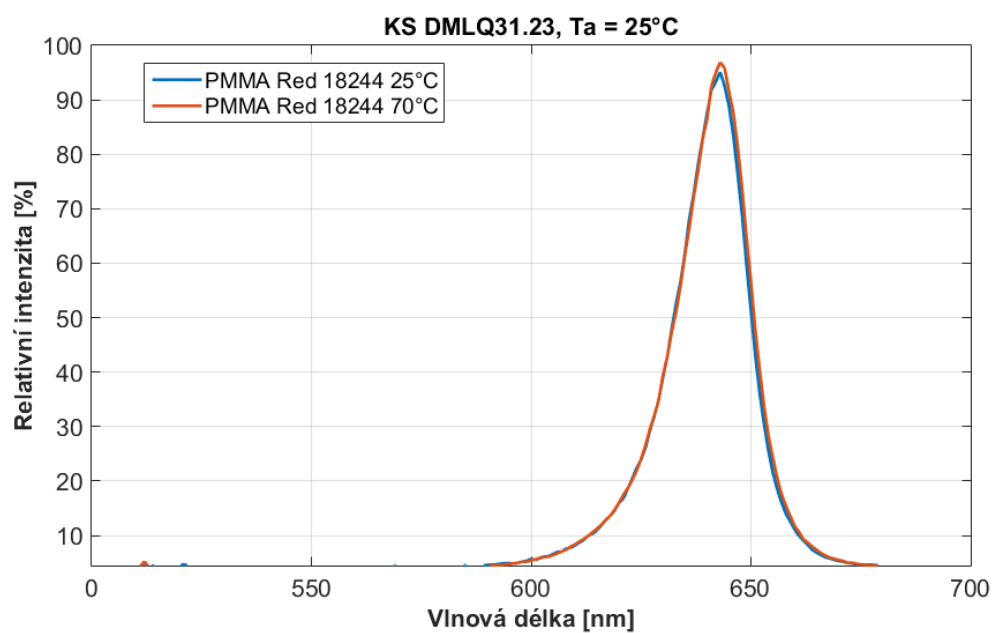
Grafy absorpcí pro různé teploty materiálu - barevné LED

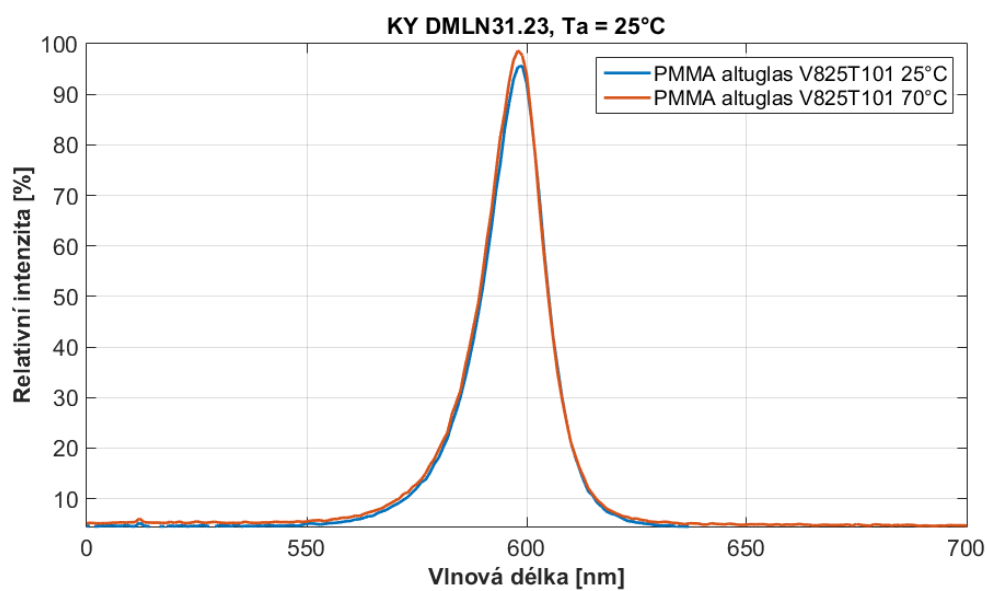
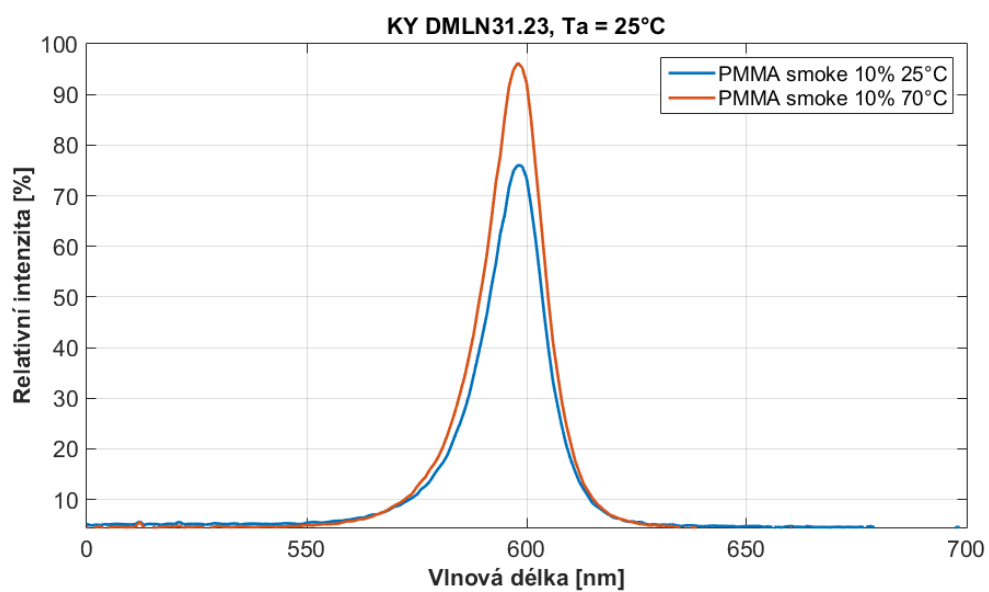


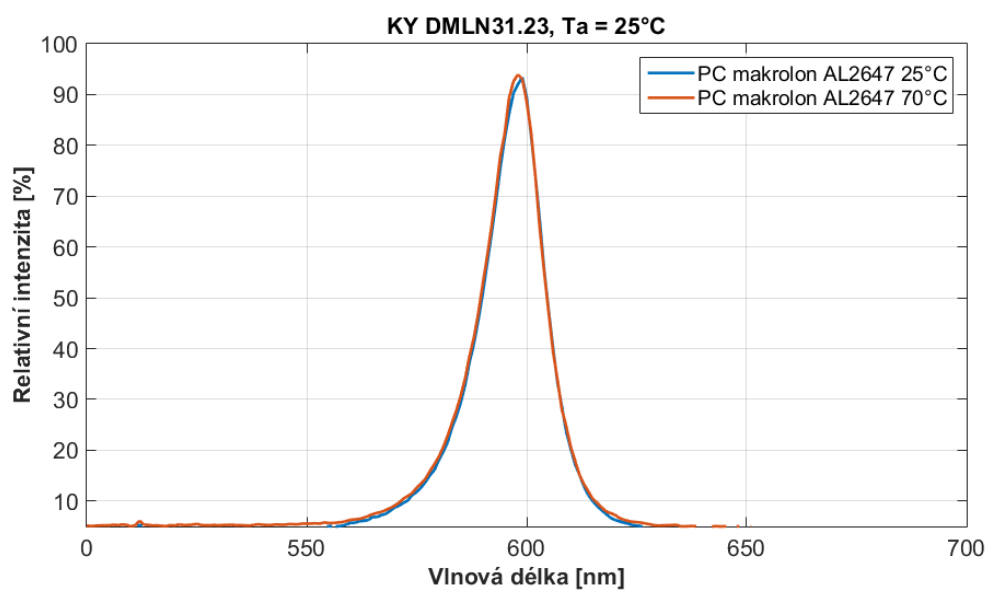
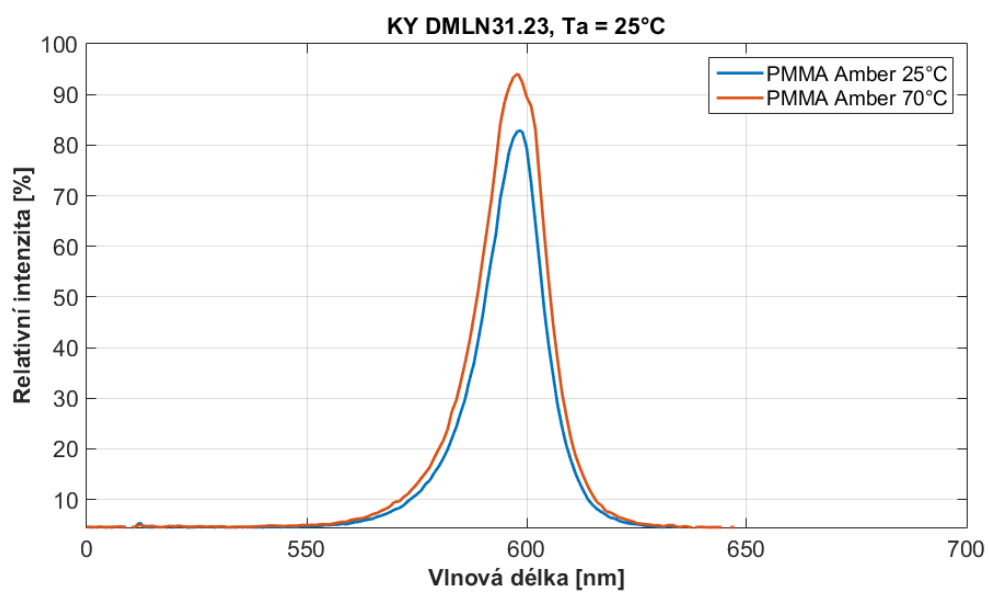


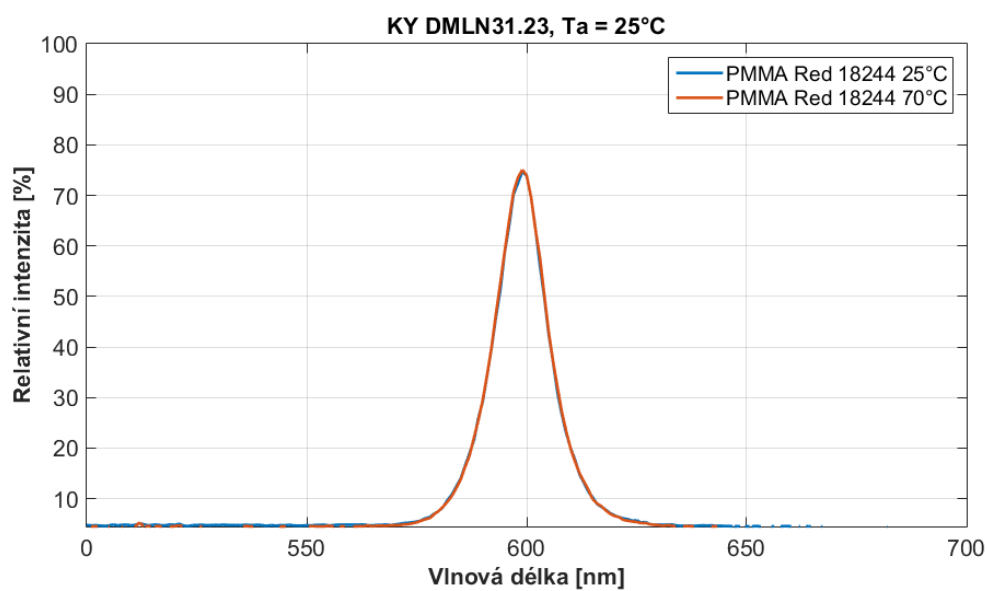
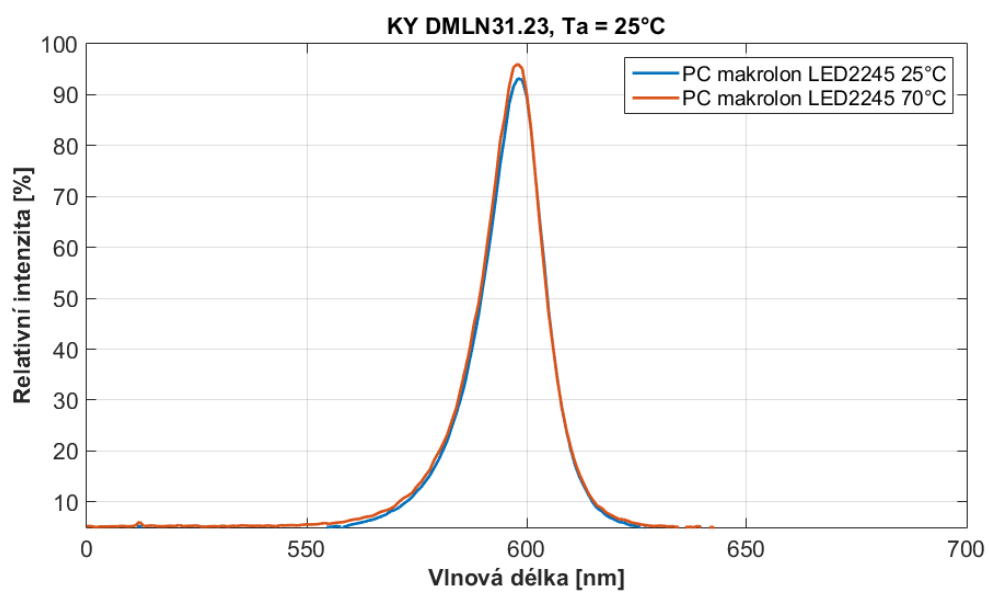


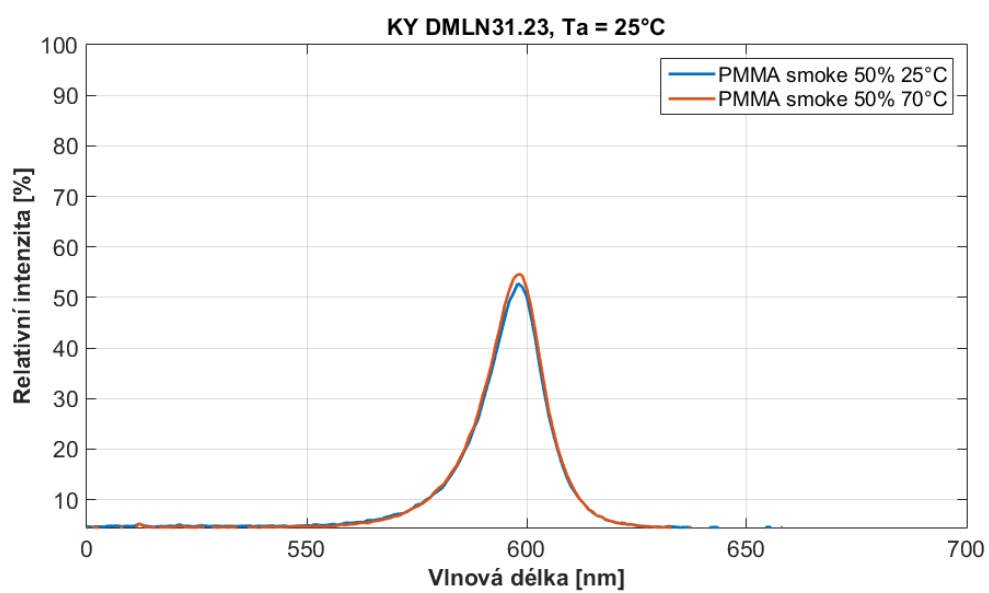
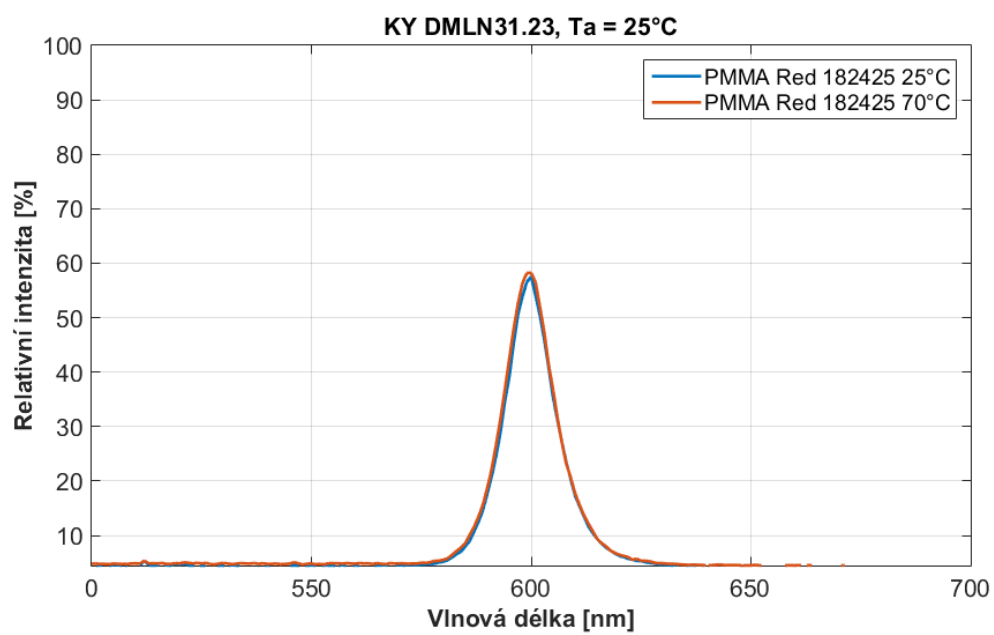


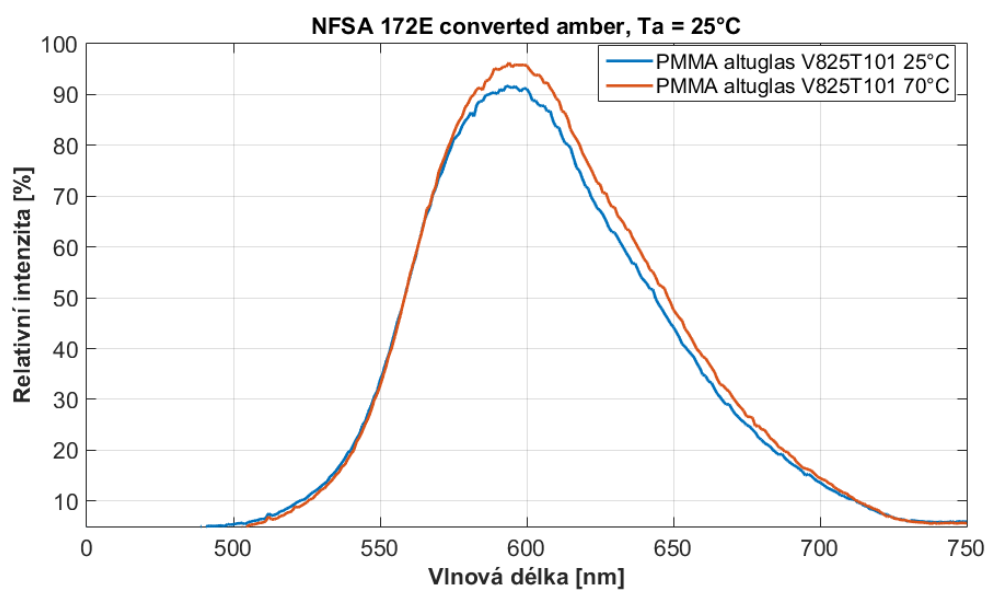
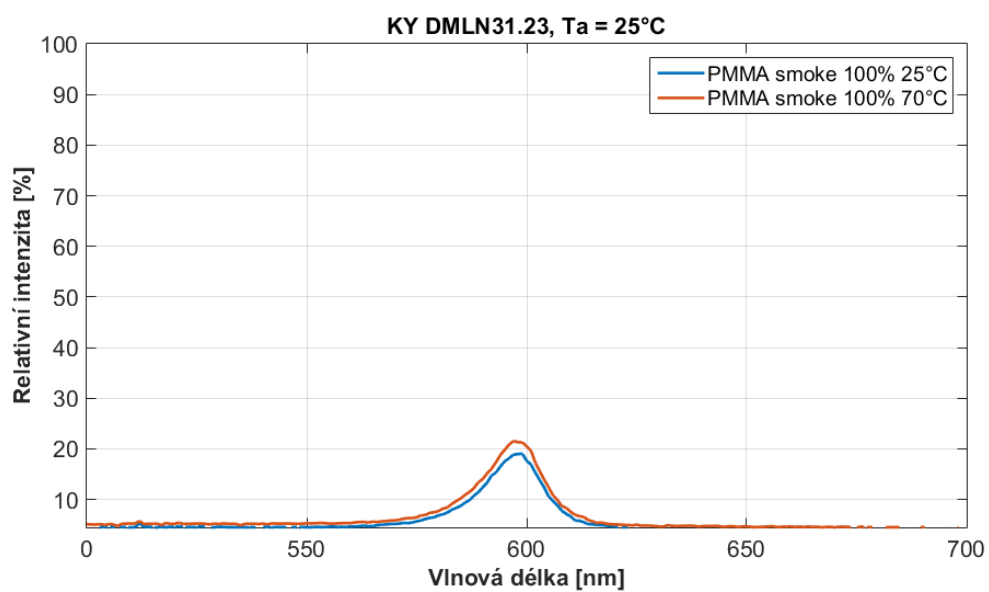


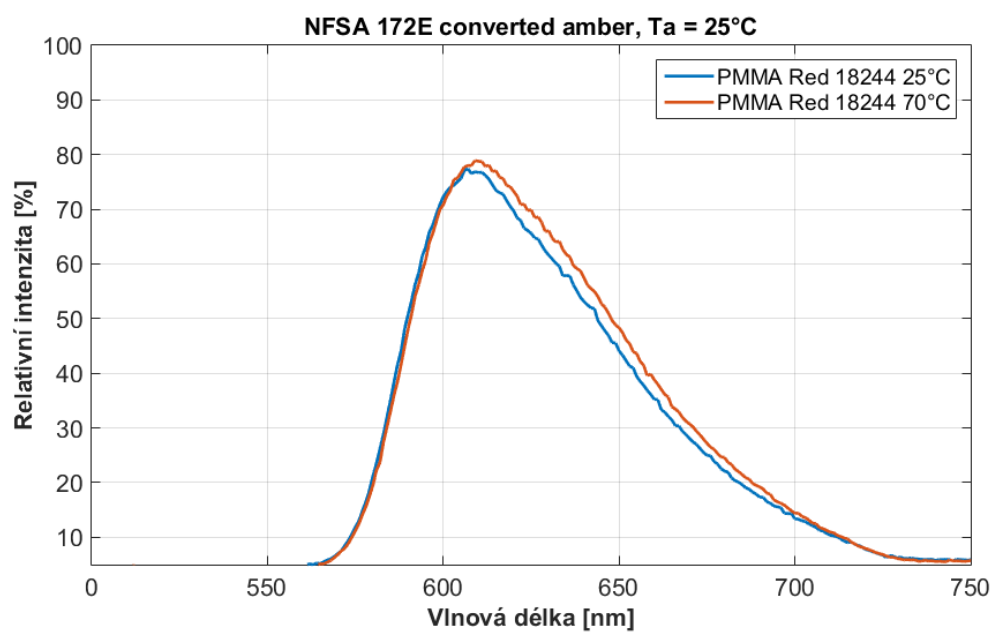
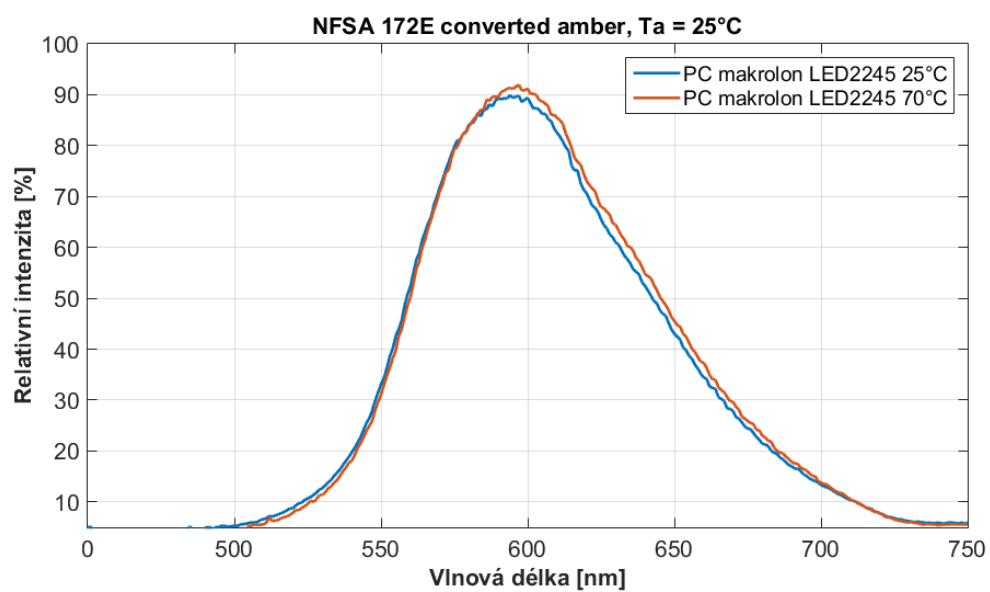


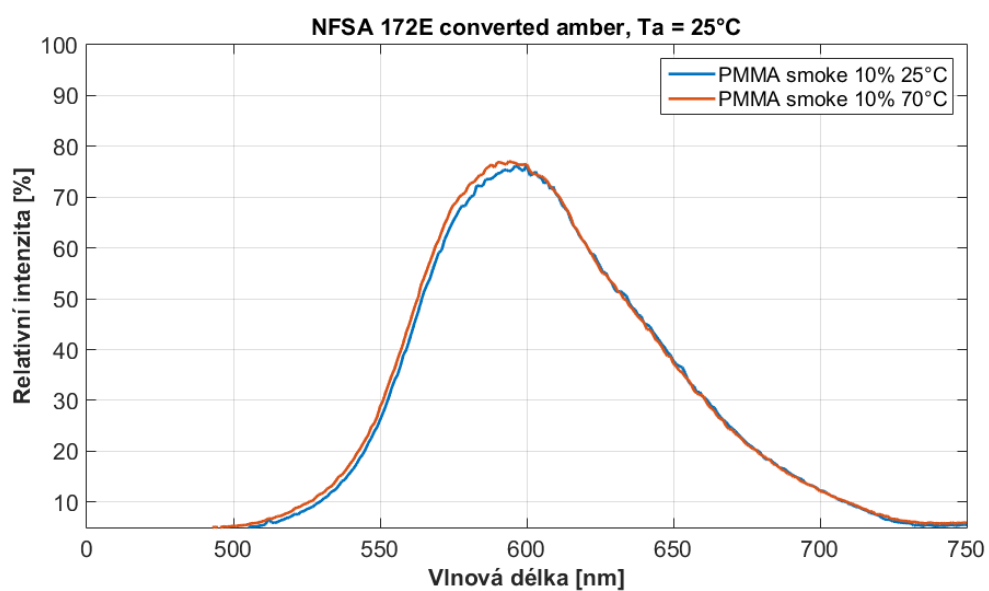
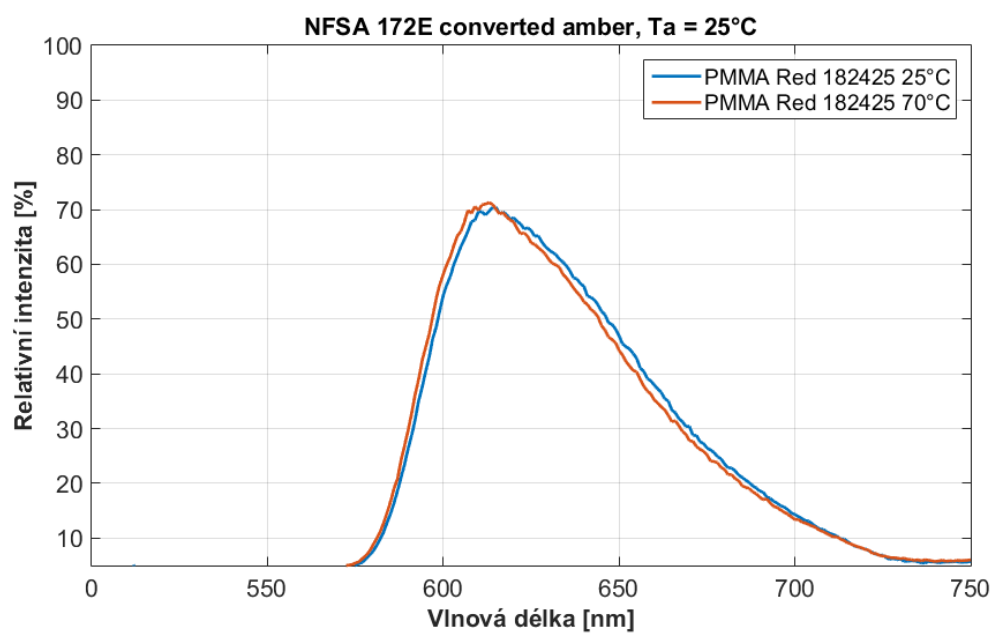


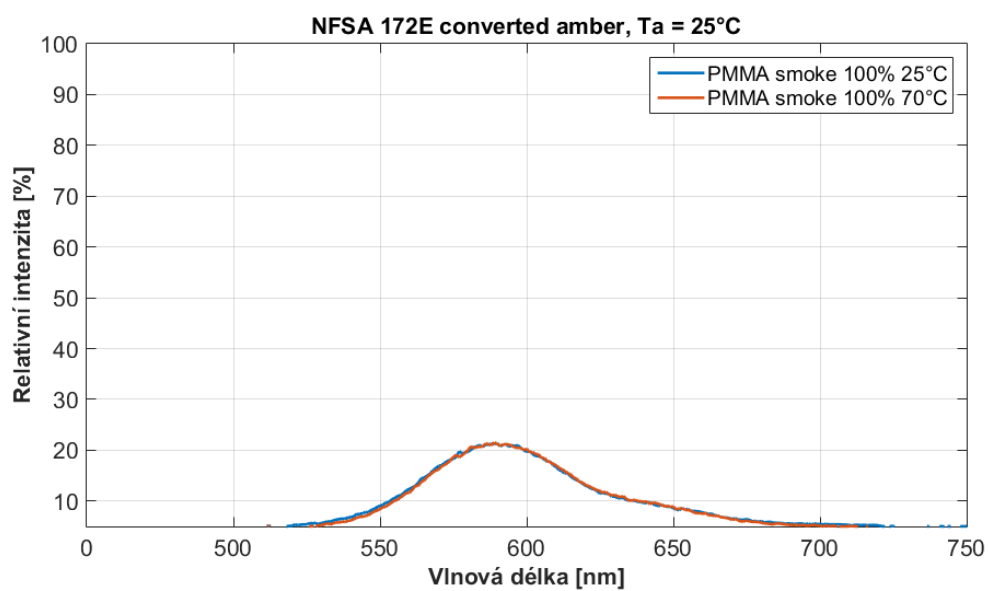
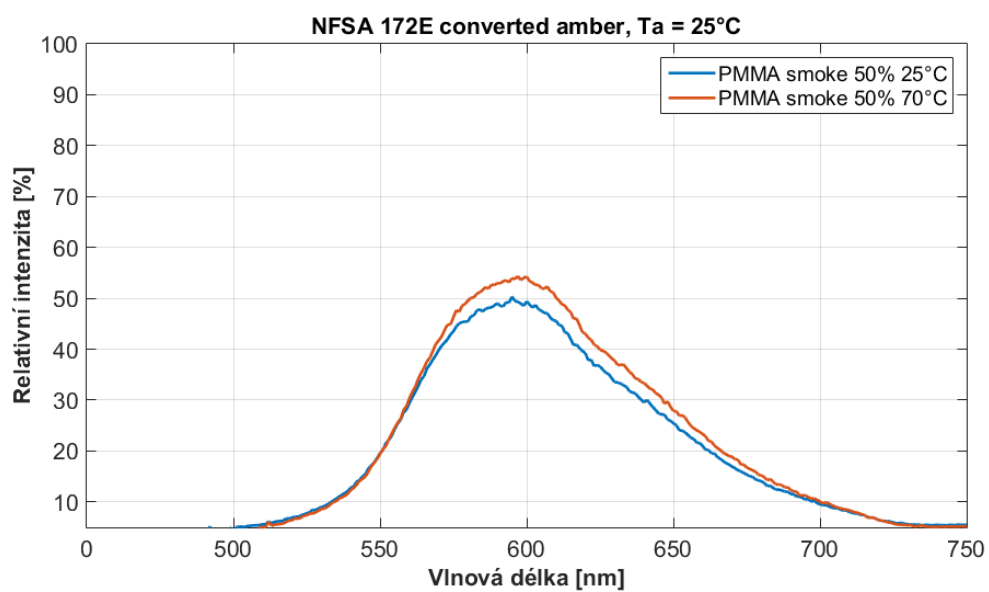












Grafy absorpcí pro různé teploty materiálů - bílé LED

